



Eesti Maaülikool  
Metsandus- ja maaehitusinstituut  
Maaehituse osakond

Tarko Jõgis

# **VERTIKAAL- JA HORISONTAALKOORMUSE KOOSMÕJU UURIMINE MUDELKIILVAIA KATSETES**

## **INVESTIGATION OF INTERACTION OF VERTICAL AND HORIZONTAL LOADS IN TESTING THE WEDGE PILE MODEL**

Magistritöö  
Maaehituse erialal

Juhendajad:  
Lektor Villu Leppik  
Doktor Mait Mets

Tartu 2017

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Tarko Jõgis		Õppekava: maaehitus	
Pealkiri: Vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju uurimine mudelkiilvaia katsetes			
Lehekülgi: 91	Jooniseid: 58	Tabeleid: 10	Lisasid: 98
Osakond:	Maaehituse osakond		
Uurimisvaldkond:	Geotehnika		
Juhendajad:	Lekt. Villu Leppik; Dr. Mait Mets		
Kaitsmiskoht ja aasta:	Tartu, 2017		
<p>Kiilvaiade kasutamine ja arendamine on Eestis ainulaadne, välismaades sellist tüüpi vaiasid ei kasutata. Peamiseks probleemiks kiilvaiade puhul on arvutusmetoodika puudumine erinevate koormusjõudude korral. Sellest probleemist tulenevalt on antud töö peamiseks eesmärgiks uurida mudelkiilvaia, millele on rakendatud vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju. Taoliste kiilvaiadega pole tehtud katseid, mis oleks vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul koormatud.</p> <p>Uurimismeetodina kasutati katselist lähenemist. Käesolevas töös uuriti labori pinnasekastis vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju kiilvaimudelile. Lisaks uuriti katsete käigus dünaamilist kandevõimet ja staatilist kandevõimet. Kõik katsed viidi läbi mudeliga KV40/6T, mis on 2m kiilvaia 5 kordne vähendatud mudel. Kõikide katseliikidega sooritati kolm katset, et katsetulemused oleksid usaldusväärsemad, kokku tehti seega 24 katset. Analüüside ja järelduste tegemiseks koostati graafikuid ning töödeldi statistilisi andmeid, tulemusi võrreldi olemasoleva kirjandusega. Käesolev töö kontrollib väidet, mille kohaselt kiilvaiade kandevõime graafik vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul on kõver.</p> <p>Katsetulemuste analüüsist selgus, et horisontaalkandevõime suureneb kui rakendada vertikaalkoormust 50-60% staatilisest kandevõimest antud katsevaiale. Kiilvaimudel käitub vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul hoopis erinevalt kui esialgu arvati. Selgus, et vertikaalkoormuse suurendamisel suureneb ka horisontaalkandevõime. Kiilvaiade kandevõimegraafiku joone moodustab kolmanda astme polünoom, mis on kõver. Kõikidest katsetulemustest esitati statistiline mudel ehk valem arvutamaks tekkinud olukordi.</p>			

Valemid on saadud katsetades ühte tüüpi mudelvaia samadel tingimustel liivpinnasel. Katsetulemustest selgus väga oluline aspekt, et pinnases tekkivad praod kiilvaia ülaosas on erinevad ja sõltuvad vertikaalkoormusest. Suurema vertikaalkoormuse juures hakkab horisontaalset liikumist takistama suurem pinnasemaht kui väiksema koormuse juures. Selgus, et horisontaal-ja vertikaalkandevõime vahelisel seosel esineb kaks eraldi tsooni, millest üks on lineaarne ja teine mittelineaarne.

Märksõnad: vaivundament, kaldkoormus, kandevõime, mudelkatsetused.

Estonian University of LifeSciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Tarko Jõgis		Specialty: Civil Engineering	
Title: Investigation of interaction of vertical and horizontal loads in testing the wedge pile model			
Pages: 91	Figures: 58	Tables: 10	Appendixes: 98
Department:		Department of Rural Building	
Field of research:		Geotechnics	
Supervisors:		Lect. Villu Leppik; Dr. Mait Mets	
Place and date:		Tartu 2017	
<p>The use and development of wedge piles is unique to Estonia, as other countries do not implement that type of technique. The main problem while using wedge piles is the lack of calculating methodology to assess different load forces. Thus, the aim of this thesis is to research a model wedge pile under the concurrence of vertical and horizontal loads. Similar experiments with wedge piles carrying both types of load forces have not yet been attempted.</p> <p>Various experiments were used as a research method. These experiments included researching the effects of vertical and horizontal loads to wedge piles placed in soil. In addition to that, the experiments assessed dynamic bearing capacity and static bearing capacity. All experiments were carried out with the model KV40/6T, which is a reduced model of a 2 m long wedge pile. In order to increase the reliability of the results, all types of experiments were carried out three times, counting up to 24 experiments in total. Analysis and conclusions were based on graphs and interpretations of quantitative data. The results were compared with pre-existing academic articles in similar fields. The main hypothesis of this thesis states that the bearing capacity graph of wedge piles under vertical and horizontal loads is curved.</p> <p>The analysis of the experiment results showed that horizontal bearing capacity increases, when 50-60% of the vertical static capacity is applied to a single wedge pile. The effects of vertical and horizontal loads on the wedge pile model is different than originally expected. It appeared, that the increase in vertical capacity correlates with the increase of horizontal bearing capacity. The bearing capacity graph of wedge piles is a 3<sup>rd</sup> degree polynomial, meaning the graph is curved. A statistical model was based on all experiment results, in</p>			



order to create a suitable formula by testing a single type of wedge pile model in similar conditions on sandy soil. A very important aspect about the results was the fact, that the cracks in the soil around the upper part of the wedge pile are different and depend on the amount of vertical load. A heavier vertical load means that the horizontal movement is obstructed by a larger amount of soil than compared to a lighter vertical load. The connections between horizontal and vertical bearing capacities turned out to divide into two different zones, one of which is linear and the other non-linear.

Keywords: pile foundation, inclined load, bearing capacity, model tests.

# Sisukord

SISSEJUHATUS .....	7
1. TEEMAALASE KIRJANDUSE ÜLEVAADE .....	9
1.1 Kiilvaiade kasutamisest lühidalt .....	9
1.2. Kiilvaiade kandevõimest lühidalt .....	12
1.3 Dünaamiline kandevõime .....	13
1.4 Staatileine kandevõime.....	17
1.5 Kandevõime hindamine osavarutegurite abil .....	19
1.6 Horisontaal- ja vertikaalkandevõime .....	22
1.7 Lühidalt varasemalt tehtud kiilvaiuuringutest .....	30
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	32
2.1 Kiilvaimodelite kirjeldus .....	32
2.2 Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus.....	33
2.3 Katseseadmestik .....	34
2.3.1 Pinnasekast ja talastik.....	34
2.3.2 Kangpressi ülekande mehhanism .....	36
2.3.3 Mõõtmis- ja koormamisseadmed .....	41
2.4 Katsemetoodika .....	45
2.4.1 Katseplaan .....	45
2.4.2 Tegevuskava .....	45
3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS .....	50
3.1 Dünaamiline kandevõime .....	50
3.2 Staatileine kandevõime mudelil .....	56
3.3 Staatilised koormuskatsed kangpress ülekande seadmega .....	58
3.3 Vertikaal-ja horisontaalkoormuse koosmõju mudelil.....	60
3.4 Horisontaal- ja vertikaalkandevõime kiilvaial.....	65
3.5 Horisontaalkandevõime ja staatilise kandevõime võrdlus.....	69
3.6 Staatilised katsed märjas liivas .....	73
4. ARUTELU .....	75
4.1 Dünaamilise kandevõime võrdlus staatilise kandevõimega .....	75
4.2 Katsetulemuste rakendamine .....	77
4.3 Mudelkatsetuste võrdlus .....	79
Kokkuvõte .....	84
Kasutatud kirjandus .....	87
Lisad .....	92
Lisa 1. Katseprotokollid .....	93

## SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö uurimismetoodikaks on valitud katseline lähenemine. Eesmärgiks on katsetada ja uurida kiilvaia horisontaal-ja vertikaalkoormuse koosmõjul. Selleks töötati välja katseseade, mida on sobilik kasutada käesoleva töö kirjutamiseks. Varasematel aastatel on tehtud erinevaid uurimusi seoses kiilvaiadega. Kiilvaia horisontaalkandevõimet uuris 2016. a. Linde Meelis oma diplomipraktikas „Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine“ ning kiilvaiade vertikaalkandevõimet uuris 2015. a. Erko Vares oma lõputöös „Kiilvaimodelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused“. Kiilvaiade horisontaalkandevõimet on varem uuritud ka 1987. aastal Eesti Kolhoosiehituse poolt.

Töö eesmärgiks on välja pakkuda kiilvaiade mudelarvutuse jaoks horisontaal-ja vertikaalkoormuse koosmõjul mudel ning uurida, kuidas muutub vaia horisontaalkandevõime vertikaalkoormuse muutmisel. Lõputöö käigus tutvuti antud valdkonnas varem teostatud tööde ja uurimustega. Sobivaks mudeliks võeti KV40/6T, mis on 5 korda vähendatud kujul reaalsest kasutatavast 2m kiilvaiast. Mudeli katseteks sai tehtud kolm vertikaalkandevõime katset mudeliga KV40/6T (terasvai), mida ka Vares oma töös uuris. Katse eesmärgiks oli kontrollida terasvaia vertikaalset kandevõimet, et saada teada koormusastmeid ja lõppkoormust, mida rakendati katseseadmel. Vares Erko kasutas oma töös katsemudelitena mitme erineva mõõtmega betoonist mudelkiilvau. Antud töös kasutatakse teraskiilvaia tähisega KV40/6T. Tööd viidi läbi Eesti Maaülikooli laboris, kuna seal oli võimalik teostada katseid pinnasekastis ja olid olemas mehhanismid koormuste rakendamiseks. Laboris olev katseseade võimaldas algselt määrata eraldi kas horisontaal- või vertikaalkandevõimet. Kahe koormuse koosmõju uurimiseks tuli katseseadet täiustada, selleks töötati välja spetsiaalne jõudude rakendamise süsteem.

Töö käigus viidi läbi rohkelt laborikatsetusi mudelkujul kiilvaiaga. Katsetati vaia erinevate koormusastmetega ja erinevatel suundadel. Antud töö raames katsetati kiilvaia kolmel olulisel viisil: dünaamilisel, staatilisel ning horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul. Katsetulemustest on koostatud protokollid ning graafikud iseloomustamaks vaia kandevõimet. Samuti on katsete põhjal läbi viidud andmete töötlus ning vaadeldud vaia liikumist koormamisel.

Ehitusvaldkonnas on tähtsal kohal mudelipõhised katsetused, kuna täissuuruses kiilvaiadega uuringute läbiviimine osutub kalliks ja keerukaks. Samas on kiilvaiu vaja pidevalt arendada ja selleks on hea läbi viia teaduslikke uuringuid vähendatud mudelitega. Mudelvaia katsetuste käigus selgitatakse välja nende käitumine pinnases, kus katsevai on erinevalt koormatud ning analüüsitakse kandevõime muudatusi. Saadud mudelkatsetuste tulemuste põhjal tehakse järeldused, mis annavad täissuuruses vaiade kasutamisel aluse mõningate järelduste ülekandmiseks. Selleks on vaja võrrelda mudelvaiade katsetulemusi täissuuruses vaiade katsetulemustega. Katseid on tehtud täissuuruses vaiadega ainult eraldi staatiliselt ja horisontaalselt, seetõttu saab antud hetkel lähtuda ainult mudelkatsete andmestikust. Tuginedes eelnevalt tehtud töödele, kus on uuritud mudelvaiadel tehtud katseid täissuuruses vaiadega, on antud töös võimalik hinnata, milliseid mudelvaiadele tehtud järeldusi saab üle kanda ka täissuuruses vaiadele.

Mudelvaia katsetel uuriti dünaamilistel katsetel saadud vastete ja staatilistel katsetel saadud kandevõime vahelisi seoseid. Järgnevates alalõikudes tuleb sellest pikemalt juttu. Peamiselt kasutatavate vaiade kandevõime valemid peavad paika ka mudelvaiade puhul. Selleks leitakse kasutatud mudelite tegelik kandevõime staatiliste koormuskatsetega. Katsemudeli tegelikuks kandevõimeks arvatakse (teaduslike andmete põhjal) proportsionaalsuspiir, roomepiir või roomelävi (lühendina  $N_{pr}$ ). Katsemudeli kandevõimet võrreldakse kandevõimevalemite hinnangutega, mille arvutamiseks on viidud läbi dünaamiline koormuskatse. Püütakse uurida vertikaalkoormuse ja horisontaalkandevõime vahelist seost. Antud töö üheks peamiseks eesmärgiks ongi seda väidet uurida.

Üksikasjalikult räägitakse vaia horisontaal- ja vertikaalkandevõime muutuste kohta koormuste rakendamisel. Viimases peatükiks arutletakse saadud tulemuste üle ning tehakse järeldusi. Töös on üks lisa: lisa 1 esitatakse terve katseandmete protokoll ja graafikud.

Huvi teadustöö vastu tunneb AS Kurmik, kes tegeleb kiilvaivundamentide projekteerimise ja ehitamisega üle kogu Eesti. Antud töös on läbi viidud katsetused mudelil, mis on tähtsad eelkõige sellepolest, et nende tulemustest saab teha järeldusi täissuuruses vaiadele. Eelnevad magistritööd on tõestanud, et mudelvaiad käituvad sarnaselt täissuuruses vaiadega.

# 1. TEEMAALASE KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Kiilvaiade kasutamisest lühidalt

Võru KEK hakkas 1977. aastal otsima tuntud lintvundamendi kasutamisele alternatiivlahendusi ning võttis kasutusele kiilvaiad. Selleks loodi töörühm, kus insenerid M. Metsa ja A. Kuddu said üheks ülesandeks loobuda madalvundamentidest, mida tuleb kaevata sügavale. Leiti, et alternatiivlahendus on vaiadele üleminek, mis võimaldab tuua vundamendi ehituse maa pinnale. Ehitustöödega, kus kasutati proovivaiu, hakati pihta sügisel Lõuna-Eestis, kus pinnaseks on savikas moreenpinnas. Eestis sajab sügisel tihti vihma, seetõttu tihedate vihmahoogude tõttu muutub pinnas ehitusmasinate tegevuse järel suureks poriväljakuks. Insenerid M. Metsa ja A. Kuddu uurisid ja leidsid eesmärgi täitmiseks lühikesed, rammitavad paindejäigad vaiad nagu püramidaal- ja trapetsvaiad, mis omavad kaldtahke. Võru KEK-is otsustatigi esialgu kasutusele võtta püramidaalvaiad. [5]

Vaiade kasutus tolleaegses NSV Liidus hakkas mitmel pool laialt levima. Vaiade kasutusele võtmisel tekkis aga mitmeid tehnilisi probleeme. Enamus probleeme esines vaiade transpordil, paigaldamisel ja valmistamisel ehk tehnoloogia praktilisel kasutamisel. Keeruliseks osutus püramidaalvaiade valamiseks vajaliku vormi saavutamine, ruumimahukus ning vaiade valmistamiseks vajaminev suur tootmispind. Püramidaalvaiad eeldasid oma kaalu ja kuju tõttu spetsiaalset transporti ja lisaks tuli prismaatiliste vaiade rammimiseks mõeldud rammseade ümber ehitada. Nendele probleemide lahendamiseks pakkusid eelnimetatud insenerid välja kiilvaia idee, millel erinevalt püramidaalvaiast on vaid kaks kaldtahku, ülejäänud kaks tahku on vertikaalsed. [5]

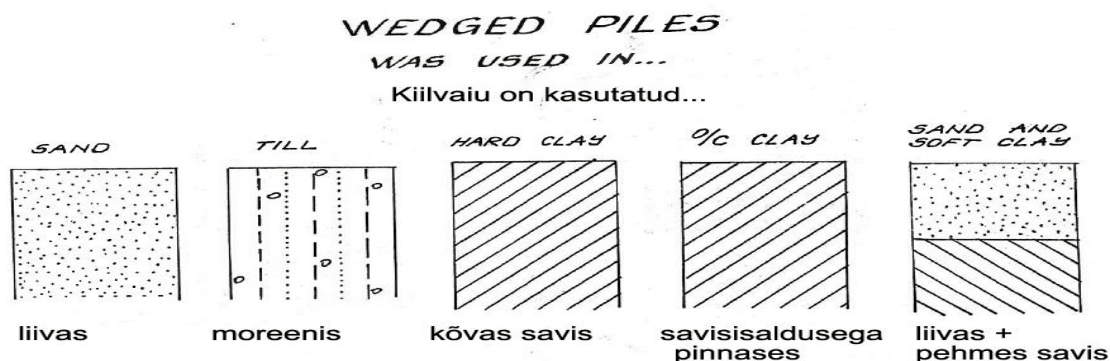
Kiilvaiade eelised püramidaalvaiade suhtes on nende valmistamiseks vajaliku vormi tasapinnalisus. Seepärast nõuab kiilvai vähem ruumi ning ka vormi valmistamiseks kulub vähem materjale. Kiilvaiade puhul on lihtsam ka transport ja ladustamine. Kiilvaia kaal on väiksem, lisaks on kaks vertikaalkülge, mis võimaldavad vaiade ladustamise üksteise peale. Vaiade transpordiks spetsiaalset veokit enam vaja ei olnud. [5]

Eestis hakati 1981. aastal tegelema põhjalikumalt kiilvaivundamendi väljatöötamisega ja praktikas kasutamisega. Ühendussõlm vaia ja karkassiposti vahel plaaniti esialgu monolitiseerida, kuid montaažis tekitaks see tehnoloogilise pausi. Ühendussõlmes töötati välja teistsugune lahendus, kus karkassipost keevitati vahetult kiilvaia külge. Selleks tuli posti ja vaia sisse monolitiseerida vastavad tarirauad. Hiljem töötati välja ka sõlm, kus spetsiaalne ankrupakett keevitati vaia külge. Sõlmede väljatöötamisel oli vajalik töötada välja ka meetodika vaia kandevõime määramiseks ning seostada see kehtivate normidega. Võrus loodi tehniline baas vaiade tootmiseks ja ladustamiseks. Tehti ja töötati välja kiilvaiade nomenklatuur. Rajati katseobjekte, mis võeti hiljem ka kasutusse. [5]

Eestis 1992. aastal taasiseseisvumise järel sai ehitusturg tõsise löögi ja seda suuresti just põllumajandusrajatiste ehitamise osas, mis olid olnud kiilvaivundamendi kasutamise peamine sihtgrupp. Andri Needo asutas ehitusfirma AS Kurmik 1992. aastal ning taastas kiilvaiavundamendi tootmise. Kiilvaiade kasutamine leidis peamiselt otstarbekust Lõuna-Eestis väiksemate ehituste juures, kuid üsna peagi laieneti Tallinnasse, kus olid juba suuremad objektid. AS Kurmikus töötati välja uus ankrukaarega ühendussõlm, mis ei vaja niivõrd mahukat keevitustööd. [5]

Kiilvaivundamentide projekteerimine ei erine väga tavaliste vaivundamentide projekteerimisest, kuid siiski tuleb teatud omapära silmas pidada. Suurt täpsust nõuab kiilvaiade rammimine ja selle saavutamiseks on äärmiselt tähtis maha märkida täpne vaia asukoht. [6]

Kiilvaiu on otstarbekas kasutada suuremate hoonete pindala suhtes ja väiksemate hoonete kõrguse suhtes. Efektiivne kiilvaia kasutusala on ühe kuni neljakordsete kergkonstruktsiooniga hoonete vundamentides, milleks sobivad suurepäraselt põllumajandus-, tootmis- ja kaubandushooned. Vaiasid on kasutatud mitmetes anorgaanilistes täitepinnastes, liivas ja savipinnases. Kiilvaiu võib kasutada ka jämeperu ja veeriseid sisaldavates pinnastes. Vaiade kasutamisel moreenis ja suure veesisaldusega liivades annab majanduslikult parima efekti. Pinnased, mis sobivad kiilvaiadele, on näidatud joonisel 1.1 [6]



**Joonis 1.1** Kiilvaiade kasutamiseks sobilikud pinnased [12]

Kiilvaiade arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioonis soovitatakse vaiu kasutada savipinnases, kus konsistentsinäitaja on  $IL = 0 \dots 0,75$  ja deformatsioonimoodul  $E > 3$  MPa. Külmakerkeohtlikkust kontrollitakse täiendava arvutusega. Savipinnase puhul võib olla konsistentsinäitaja väiksem nullist. Liivpinnas on samuti sobilik, välja arvatud kohev liiv deformatsioonimooduliga  $E < 5$  MPa. Pinnases, mis ei vasta antud kirjeldusele ja mille deformatsioonimoodul on  $E < 3$  MPa, lubatakse kasutada kiilvaiu vaid eritingimustel. [7]

AS-i Kurmiku poolt toodetakse erineva pikkusega ja armeeringuga kiilvaiu. Meeskond on arendanud välja kiilvainomenklatuuri peamistest toodetavatest vaiadest, mis on näidatud joonisel 1.2. [5]

Kiilvaia kuju	Mõõtmed			kaal kg	Materjal	
	L mm	a mm	b mm		teras kg	betoon m <sup>3</sup>
	1500	470	300	300	12,4	0,12
	2000	600	300	510	14,3	0,21
	2500	730	300	760	34,0	0,31
	3000	860	300	1060	62,4	0,43

**Joonis 1.2.** Kiilvaiade nomenklatuur vastavalt tehnilistele tingimustele [12]

Kasutusele on võetud ka 1,5 meetri pikkune kiilvai ja paindejäigad vaiad. Kiilvaiade kõige otstarbekam külgpindade kalle on ligikaudu 1:7,7, mida peeti kõige efektiivsemaks kaldenurgaks. Põhiliselt kasutab AS Kurmik rammimisseadmetena kahte diiselhaamri ja ühte vibroseadmega rammimismasinat.

## 1.2. Kiilvaiade kandevõimest lühidalt

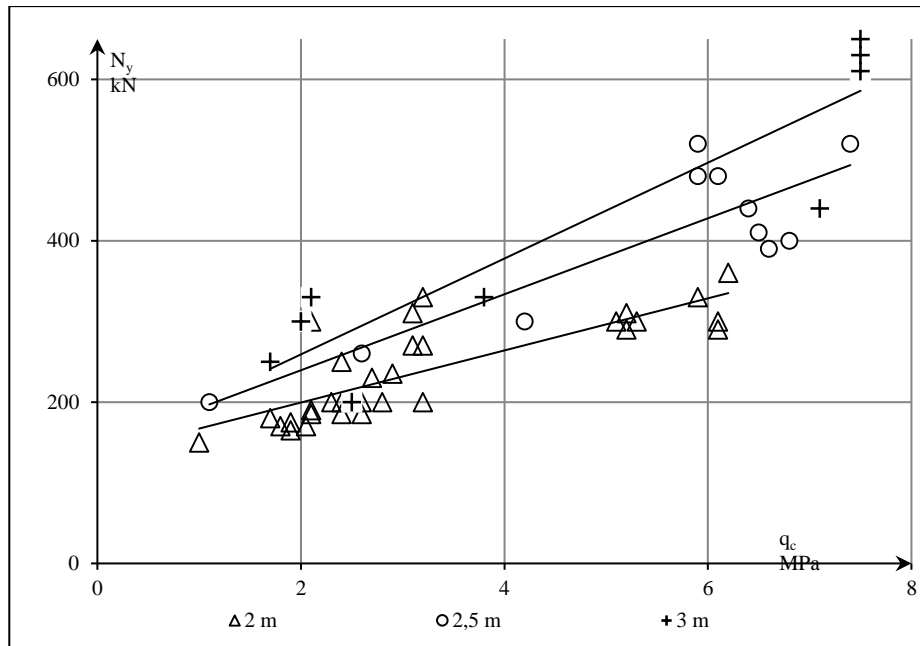
Vaiade kandevõimet on rammimisel suhteliselt täpselt võimalik määrata. Rammides proovivaia saadakse teada vaia kandevõime ja seejärel on võimalik koostada suhteliselt täpne vaiavälja plaan, mis annab võimaluse vähendada tagavara vundamendi ehitusel. Vaia kandevõime määratakse ehitise piirvajumi suurusel lähtudes SniP 2.02.03-85 järgi, milles on äärmuseni lihtsustatud skeem ning seega tekivad selle meetodika kasutamisel probleemid. Ehitis on üsna tundlik erinevate vajumite suhtes, toimuvat iseloomustab paremini vaia koormamisel proportsionaalsuspiir (Npr). Proportsionaalsuspiir on nii öelda tinglik, mille ületamisel domineerivad vaia vajumi põhjustajatena pinnase tugevusomadused. [11]

Kandevõime seisukohalt on kiilvai võimeline vastu võtma kõiki jõukomponente. Konstruktiivsetel kaalutlustel on vajalik kasutada kahte vaia, millest üks töötab survele ja teine tõmbele.

Üksikvundamentide ja kiilvaia võrdlusest järeldub, et üksiku kiilvaia töös peab olema nii vaiale kui ka tavalisele madalvundamendile omaseid jooni eeldusel, et mõlemad on sama kandevõimega. Koormamismetoodikal on katsetatud vundamendi plaate, mille tulemusena saadakse laugemad graafikud. Vaia koormamisel on need järsemad, kuid suhe proportsionaalsuspiiri ja purunemispiiri vahel on ligikaudu sama. Vaia koormamisel vertikaalsuunal jaguneb pinnasele ülekantav koormus vaia külgede ja otsa vahel. Kasutatud on seepärast ka võtet vaia kandevõime jagada kaheks teineteisest sõltumatuks osaks – otsa ja külje kandevõimeks. Vaia pea läheduses tekivad normaalpinged, mis vertikaalkülgedel kasvavad, kuid jäävad vaia otsa juures ikkagi väiksemateks. Kiilvaia vertikaalkülgedel tekkiv normaalpinge ei osale otseselt vertikaalkoormuse vastuvõtus, küll aga mõjutab külghõõret, põhjustades selle muutuse sügavuse suunas. Kiilvaia juures mängivad kõige suuremat rolli just kaldküljed ning seetõttu on leitud sarnaseid jooni katseplaadiga. [11]

Vaiade kandevõimet on võimalik hinnata ka kaudsete meetoditega, kuigi see on suhteliselt keerukas. Kõik sõltub pinnasest, omadustest ja paljudest erinevatest näitajatest. Kaudselt on võimalik määrata surupenetreerimisel leitud koonuseritakistust qc järgi, millest avaldub korrelatsioon kiilvaia purunemispiiriga. Koonuseritakistusest ja sõltuvalt vaia pikkusest saab leida vaia proportsionaalsuspiiri jooniselt 1.3. [11]





**Joonis 1.3.** Kiilvaia proportsionaalsuspiiri sõltuvus [11]

Järgmistes alajaotistes kirjeldatakse arvutusliku kandevõime leidmist koormuskatsetest ja rammimistulemustest. Jooniselt saab välja lugeda korrelatsiooni proportsionaalsuspiiri ja koonuseritakistuse vahel 2,0 m, 2,5 m ja 3,0 m pikkuste kiilvaiade kohta. Keskmised  $q_c$  väärtused annavad parimad tulemused, nii selgus korrelatsiooni uurimise käigus. [11]

### 1.3 Dünaamiline kandevõime

Üks vanim meetod on dünaamiline katsetamine. Vaiadele on rohkem kui 200 erinevat kandevõime hindamise valemit kirja pandud väljaandes „Eesti Tööstusprojekt“. Seal uuriti dünaamika valemeid ja leiti, et suuremal või vähemal määral sobivad Eesti tingimustes vaia proportsionaalsuspiiri määramiseks ligikaudu 20 läbitöötatud valemit. [3]

Esimeseks oluliseks panustajaks oli N. M. Gersevanov, kes püüdis arvestada vaia käitumist pinnases. Uurimuse käigus selgus, et dünaamiliste meetoditega on võimalik üldjuhul määrata vaid vaia proportsionaalsuspiiri. Hilisemad uurijad ei ole aga seda seisukohta arvestanud ja Gersevanovi loodud valemit on kasutatud piirkoormuse arvutamiseks, mitte proportsionaalsuspiiri arvutamiseks. [3]

Eestis on seni enim levinud Gersevanovi valem, mille uurimisele töös pöörati erilist rõhku. Teiseks enim kasutatud dünaamilise kandevõime hindamise valemiks on Gate'i valem, kus vaia staatilise proovikoormamise andmed ühtisid kõige täpsemalt. [3]

Gersevanovi valemit kasutades peab arvestama, et proportsionaalsuspiiri määramiseks tuleb kasutada 2...15mm vastetel, kuna suuremate vastete puhul valem alahindab ning väiksemate vastete juures ülehindab tegelikku kandevõimet. Mõnedest uurimistulemustest on selgunud, et staatilisel proovikoormamisel külghõõret ja proportsionaalsuspiiri ületavate koormustega kaasnevad vajumid jäävad vastavalt 1,5...2,5mm ja 5...15mm vahemikku. Vajumistel kuni 2mm vaia küljevastupanu ei ületata ning rohkem energiat kulub vaia süvistamiseks. [3]

Gersevanovi valem [3]:

$$R_{c;m} = \frac{\eta \cdot A_k}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot m_1 \cdot H}{\eta \cdot A_k \cdot S_e} \cdot \frac{m_1 + 0,2m_2}{m_1 + m_2}} - 1 \right], \quad (1)$$

kus  $R_{c;m}$  on vaia kandevõime kN;

$A_k$  – vaia ristlõikepindala, cm<sup>2</sup>;

$m_1$  – vasara kaal, t;

$m_2$  – vaia ja kaitsepea kaal, t;

$S_e$  – vaia vajum ühest löögist, cm;

$H$  – vasara langemiskõrgus, cm;

$\eta$  – vaia materjalist sõltuv tegur, t/m<sup>2</sup> (kaitsepeata puitvai:  $\eta = 100$  t/m<sup>2</sup>, kaitsepeaga raudbetoonvai:  $\eta = 150$  t/m<sup>2</sup>, kaitsepeaga terasvai:  $\eta = 500$  t/m<sup>2</sup>).

Valem annab vastuse tonnides, seega tuleb läbi korrutada raskuskiirendusega.

Gate'i valem on uurimistulemuste järgi kõige sobilikum valem rammimisandmete järgi kandevõime hindamiseks. Vaia staatilisel koormamisel saadud kandevõimed langevad kokku kui arvestada ka löögi energiat ning vaia ja vasara kaalu suhet. Gate'i valemiga saab kasutada nii raudbetoon- kui terastoruvaiu. Eesti pinnaste jaoks täiendas Gate'i valemit E. Killar. Täiustatud valemi puhul, mida on nimetatud ka Gate-Killari valemiks, tuleb  $N_G$  samastada proportsionaalsuspiiriga.

Raudbetoonvaiade puhul kehtib seos, et kui vaste on väiksem kui 5mm, siis tegur  $K=3$  ja kui vaste on suurem kui 5mm, siis  $K=2$ . Kui terastoruvaiaade vasted on vahemikus 5...40mm, siis  $K=1,5$ , vastetel 1..5mm on  $K=3$  ning vastetel 1...2mm on  $K=4$ . [3]

*Gate-Killari* valem avaldub kujul [11]:

$$N_G = K \cdot \sqrt{0,7 \cdot G \cdot H} \cdot \log \frac{25}{s_a}, \quad (2)$$

kus  $K = 2$ , kui  $s_a > 0,5$  cm ja  $K = 3$ , kui  $s_a < 0,5$  cm;

$H$  – löögiosa efektiivne kukkumiskõrgus cm;

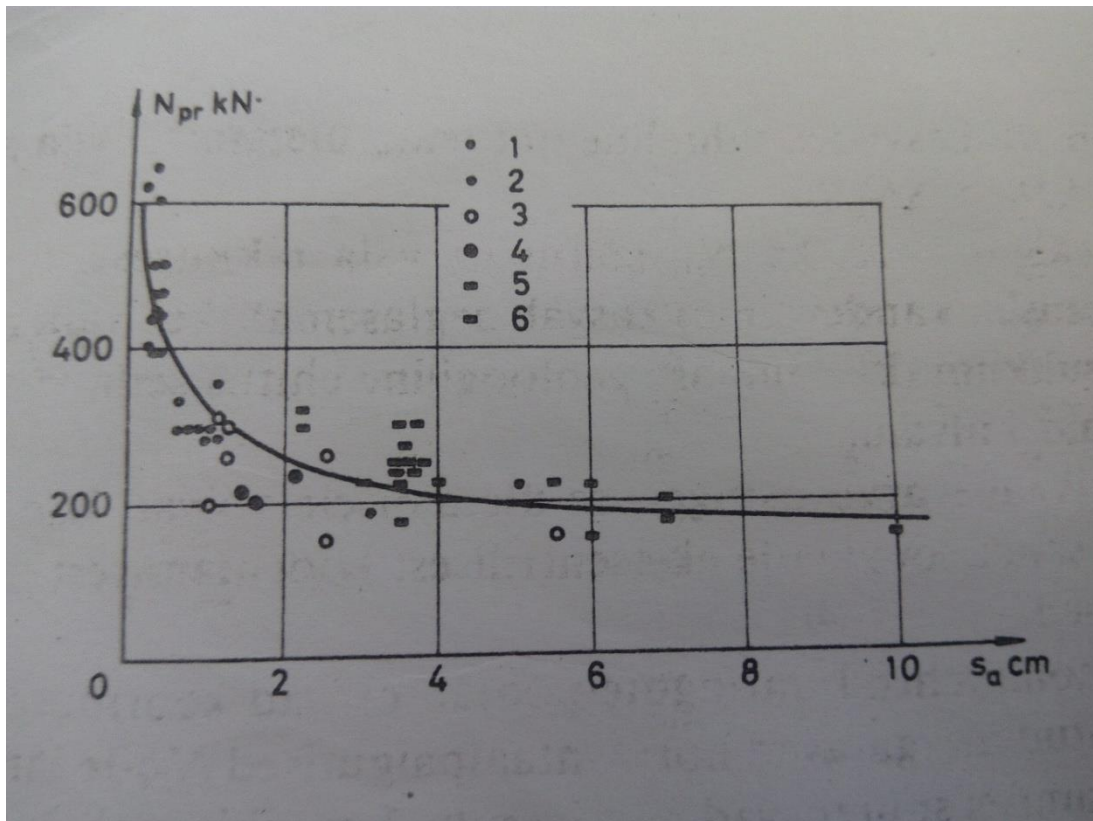
$S_a$  – vaia vaste cm;

$G$  – löögiosa kaal kN.

Esinevad ka mõned olukorrad, kus dünaamikavalemid vaia kandevõime hindamiseks ei sobi. Pinnased, kus esinevad kõva konsistentsiga paleosoikumi savid või klindiesine moreen, ei saa dünaamika valemitega määrata kandevõimet, kuna nihketugevus muutub. Pinnastel, mis on voolava konsistentsiga (näiteks saviliiv), on dünaamilise katse vaste alla 3mm või üle 15mm. Kandevõime hindamisel orgaanilist ainet sisaldavates liivades, kruusades ning teistes dünaamiliste mõjutuste suhtes tundlikes pinnastes on väga oluline teada, et pinnase struktuur puruneb osaliselt ja nihketugevus väheneb. Sellises olukorras saadakse arvutustega tunduvalt väiksem kandevõime kui on tegelikkuses. Suurem kandevõime saadakse arvutusvalemitega kui vaia rammitakse tihedasse peenliiva, milles esineb survevõime. [3]

Kiilvaia proportsionaalsuspiiri sõltuvusvastetest on tehtud mitmes Eesti eri paigas katseid, kus vasara kaal on  $G=12,5$ kN, vaia kaitsepea kaal  $q=1$ kN, vasara efektiivne kukkumiskõrgus  $H= 1,1$ m.

Kiilvaia proportsionaalsuspiiri sõltuvuse vasted leiab jooniselt 1.4. Veeküllastunud tolm-liiv: 1- Pärnu Niidu t., 2- Riia mnt-1, saviliivmoreen, 3- Turvas, 4- Obinitsas, 5- Kuldrel, 6- Rõuges. Olemasolevate andmete järgi on võimalik välja arvutada kiilvaia  $N_{pr}$  sõltuvus vastetest. [3]



**Joonis 1.4.** Kiilvaia proportsionaalsuspiiri sõltuvus vastetest [3]

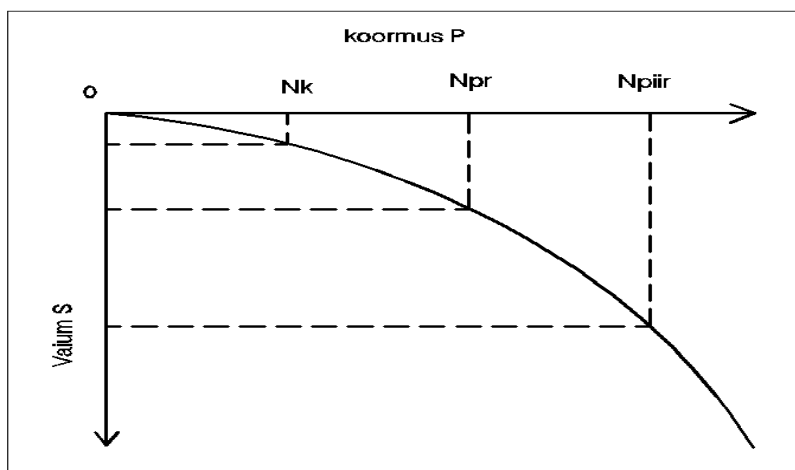
2014. aastal uuris Vares Erko oma töö raames ka dünaamilisi kandevõimeid ja staatilisi kandevõimeid erinevatel kiilvaia mudelitel. Töös on uuritud kahte põhilist dünaamilise kandevõime valemite, mis on kasutatud täissuuruste kiilvaiade puhul. Katsete tulemuste andmed lisati kahte valemisse, milleks on Gate-Killari valem (2) ja Gersevanovi valem (1). Töös selgitati välja, et Gate-Killari valem alahindab mudelvaiade kandevõimet, sest staatilistel katsetel saadi ligi 3 kordne suuruste vahe. Töös on pakutud uued parandustegurid Gate-Killari valemi jaoks, mis sobiksid mudelvaiadele.

Välja on pakutud, et tuleb samakordselt suurendada valemis olevat tegurit  $K$ , et saada arvutusega täpsem hinnang kandevõimele. Muudetud on tegurit  $K$  selliselt, et kui vaste on suurem kui 0,5 cm, siis  $K = 6$  ja kui vaste on väiksem kui 0,5 cm, siis  $K = 10$ . [13]

Töös leiti, et just Gersevanovi valem hindab kõige täpsemalt dünaamilist kandevõimet mudelvaiade puhul. Samuti kasutatakse antud valemit ka tänapäevani kiilvaiade kandevõime hindamiseks. Katsetulemustest selgus, et staatilised katsetused mudelkiilvaiadel (staatiline kandevõime) ja kandevõime hindamiseks kasutatud valem langevad hästi kokku.[13]

## 1.4 Staatile kandevoime

Vaiade rammimise järel tehakse mõne aja möödudes staatilise kandevoime kontroll. Vaiu koormatakse seni, kuni pinnas puruneb ehk tekib purunemispiir. Staatilistest koormuskatsetest tehakse tavaliselt graafikud. Graafikute paremaks mõistmiseks on toodud joonisel 1.5 välja tegurid, mis näitavad sõltuvust rakendatud koormuse ja vaia vajumi vahel. Graafikult saab välja lugeda iseloomulikke punkte ning leiab vaiale kehtivad koormuspiirid, mis on olulised vaia töö punktid. Olulisteks punktideks on  $N_{piir}$  ehk purunemispiir,  $N_k$  ehk vaia küljevastupanu piir,  $N_{pr}$  ehk proportsionaalsuspiir. Proportsionaalsuspiirist algab vaia aluse väljasurumine ning purunemispiir on koormus, millel vaia alus läheb piirseisundisse. Elastsed deformatsioonid esinevad vaia aluses, mida iseloomustab küljevastupanu ehk hõõrdepiir. [11]



**Joonis 1.5.** Staatilise kandevoime graafiku iseloomulikud punktid

Vaia kandevoimet iseloomustab kõige paremini proportsionaalsuspiir. Proportsionaalsuspiir on kaht etappi eraldav osa, sellest piirist väiksemal koormusel toimub pinnase tihenemine, suuremal koormusel algab pinnase väljasurumine vaia otsa alt. Purunemispiir on koormus, millel vaia alus läheb piirseisundisse ja vaia vajum on küllalt suur.

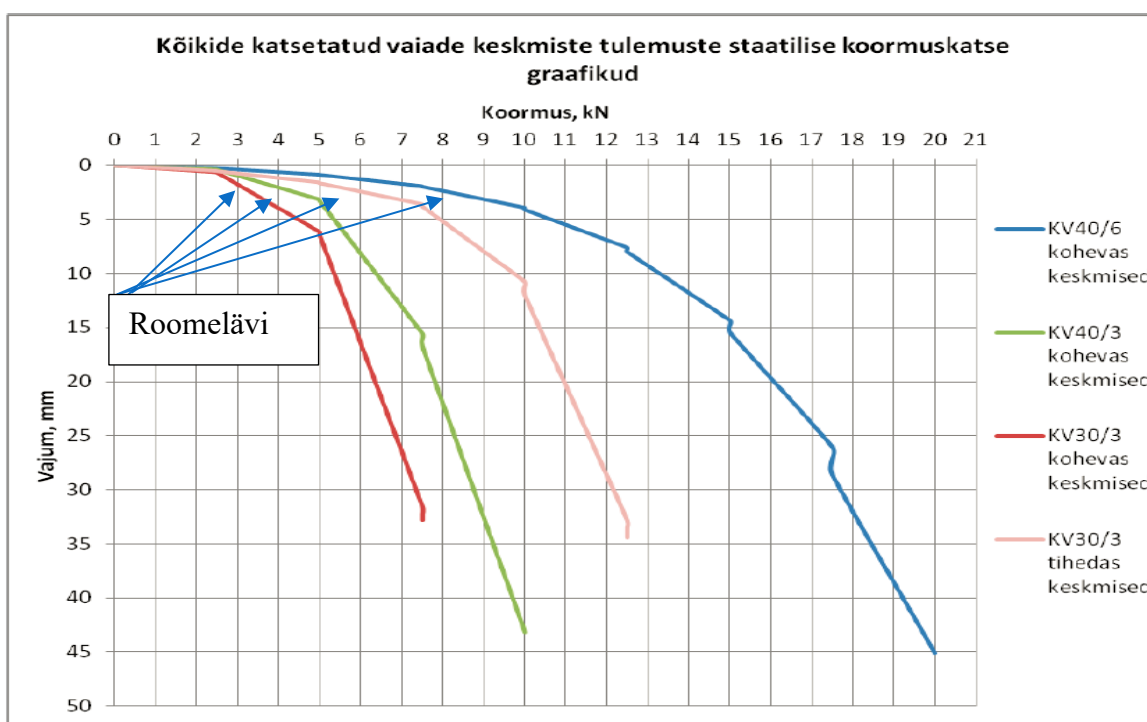
Deformatsioonide ja koormuse vahelise sõltuvuse kirjeldamiseks on õigustatud elastsusteooria kasutamine, seda kuni proportsionaalsuspiirini. Suuremal koormusel peab kasutama empiirilisi võtteid ja elastsusteooria kasutamine ei ole õige. [4]

Graafikult proportsionaalsuspiiri määramine on suhteliselt raske, kuna pideval kõveral ei ilmne selget punkti. Kiilvaia vajukid  $N_{pr}$  juures on nii liiv- kui moreenpinnases valdavalt väga ühtlased ja jäävad vastavalt 5...7,5 mm ja 7,5...10 mm piiridesse. Kui kiilvai jõuab

koormuseni  $N_{pr}$ , on vajum põhjustanud pinnase liikumise, kus on elastsed deformatsioonid. Pärast piiri ületamist tekivad plastised deformatsioonid. [11]

Sõltumata  $N_k$  suurusest on saadud kiilvaia vajumiks 0,75...2,5mm. Pinnasekihid on maapinnalähedal heterogeensed ja seega  $N_k$  määramise on omakorda sõltuv nii pinnase omadustest kui looduslikust veesisaldusest. [11]

Kiilvaia mudelite staatiliste katsete põhjal, mida on eelnevalt laboris tehtud, saab välja tuua graafiku. Kiilvaia katsete põhjal koostatud kandevõime graafikul (joonisel 1.6) on katsetatud kiilvaid tihedas ja kohevas pinnases ning kolme eri mõõtmega vaiu. Joonisele on lisatud ja välja toodud proportsionaalsuspiiride asukohad. Graafikule on märgitud need punktid roomeläve nime all. [13]



**Joonis 1.6** Kiilvaimudelite staatiliste koormuskatsete graafik [13]

Miniatuursete kiilvaiade staatiliste koormuskatsete graafik näitab vajumise intensiivsuse järsku kasvu pärast roomläve ületamist. Proportsionaalsuspiir arvestatakse arvutusliku kandevõimena. Vaia koormamine üle  $N_{pr}$  võib olla põhjendatud ainult arvutuse alusel ja piisavale geotehnilisele kontrollile tuginevalt. [11]

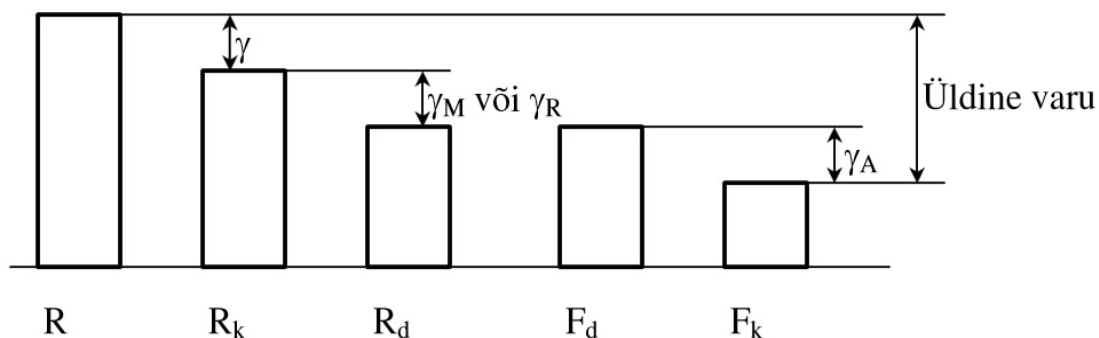
Kui kiilvaia kandevõime on määratud rammimisandmeil või valemitega, siis ei tohi vaiade roomepiiri ületada. Proportsionaalsuspiir ei oleks maksimaalselt vaiale lubatav koormus.  $N_{pr}$

piiri võib ka ületada.  $N_{pr}$  ületamine peab kõigil ehitatavate hoonete alustel vaiadel olema ühesugune, et vaia vajumid oleksid ligikaudu võrdsed. Siiski ületamine tuleb kõne alla vaid juhul, kui vaia kandevõime on määratud katseliselt ja on tehtud piisavalt geodeetilisi uuringuid, kus on võimalik määrata üksikvaia vajumise ulatust. [4]

Katsetatud täissuuruses kiilvaiadega saavutatakse  $N_{piir}$  vajumil 20...50 mm, tolkliival 20...30 mm ning moreenpinnasel 30...50 mm piires. Analüüsi käigus leiti ka seos  $N_{pr}$  ja vaia pikkuse vahel. Selgus, et  $N_{pr}$  ja arvutuslik kandevõime kasvab vaia ruumalast aeglasemalt. Soovituslikult võiks seega kasutada lühemaid vaiu, mis on kasulikumad. [11]

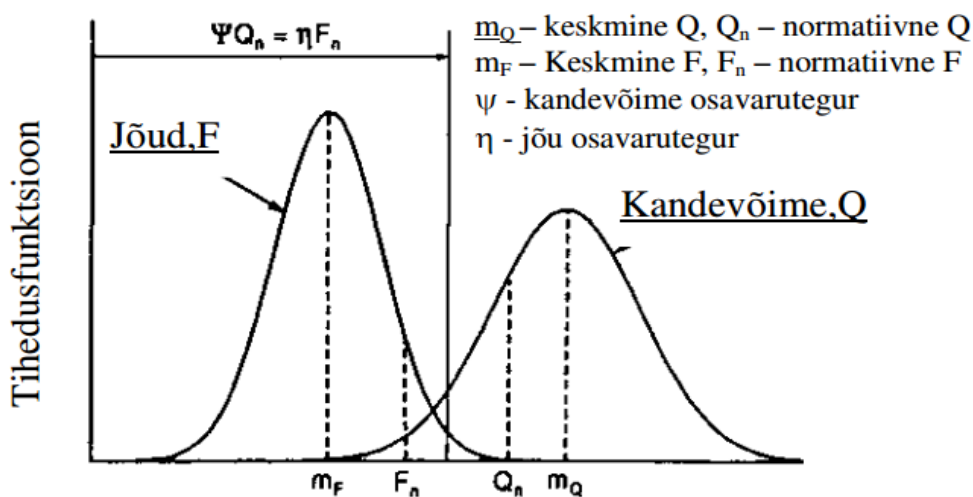
## 1.5 Kandevõime hindamine osavarutegurite abil

Projekteerimisstandardites on kehtestatud kindlad osavarutegurid. Osavaruteguritega tagatakse hoone või rajatise kindel püsimine. Muutuvkoormuste suurenemisel võib vai või vaialus puruneda, kui ei ole jäetud piisavat koormusvaru. Kasutades erinevaid meetodikaid (näiteks arvutamise meetodikaid) või koormates vaia katseliselt, siis sellest leitakse osavaruteguriga normkandevõime, millest omakorda leitakse arvutuskandevõime. Ehituskonstruksioonide projekteerimisega lähtutakse ka sarnaselt geotehnilisel projekteerimisel piirseisunditest. Enamjaolt on tegemist kahe piirseisundiga, millest peab lähtuma. Piirseisundid on kandepiirseisund (*ultimate limitstate*) ja kasutuspiirseisund (*serviceability limitstate*). Iga võimaliku arvutusolukorra kohta peab olema tagatud, et piirseisundit ei ületata. Skemaatiliselt võib kandepiirseisundi kontrolli kujutada joonisel 1.7 toodud diagrammiga. [1]



**Joonis 1.7** Osavarutegurite süsteem:  $R$  – materjali keskvaartusega määratud kandevõime;  $R_k$  – materjali normvaartusega leitud kandevõime;  $R_d$  – materjali arvutusvaartusega leitud kandevõime;  $F_k$  – normkoormus;  $F_d$  – arvutuskooormus [1]

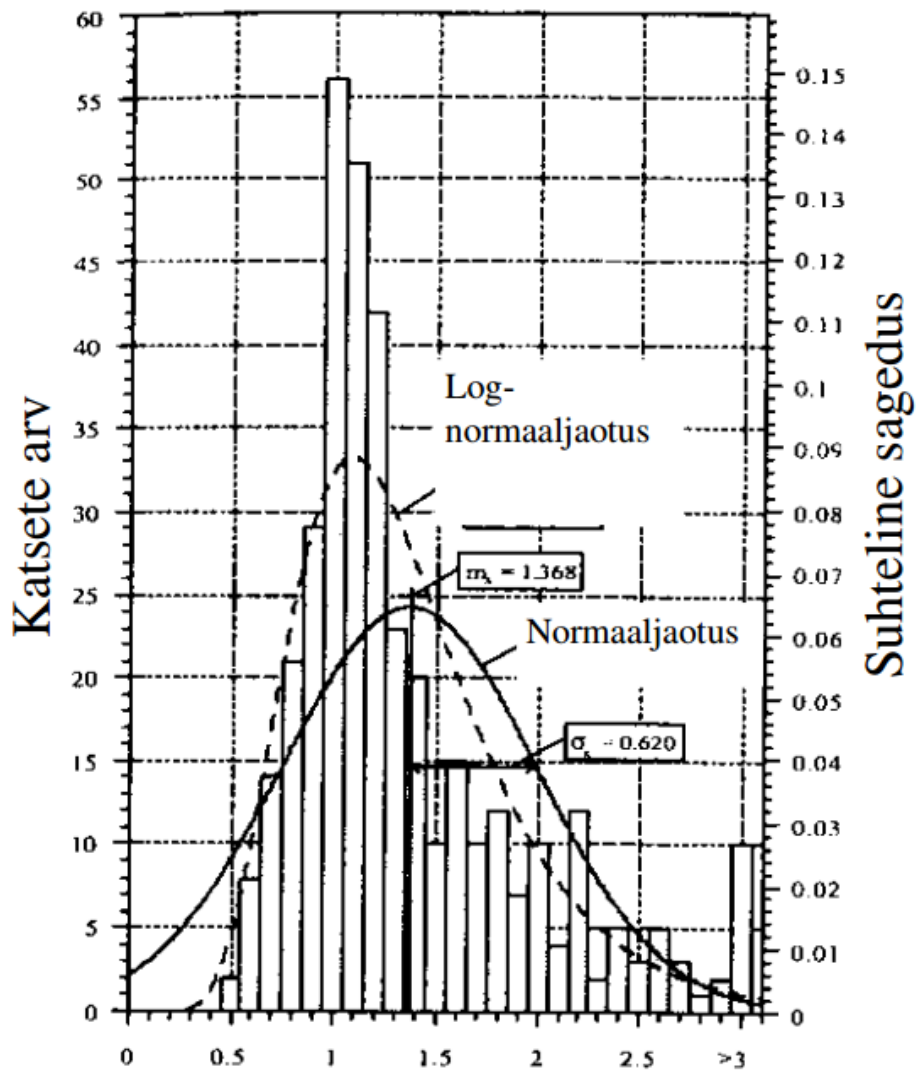
Ühelt poolt määratakse piisavad varutegurid materjali (pinnase) omadustele kandevõime määramisel ja teiselt poolt võrreldakse seda koormusega, mille juures kasutatud osavarutegurid peavad tagama, et sellise koormuse ületamine on tõenäoliselt väga väikese võimalusega. Materjali ja koormuse osavarutegurid määratakse lähtudes ehitise üldisest töökindlusest, millega saab tutvuda joonisel 1.8. [1]



**Joonis 1.8** Lihtsustatud töökindluse põhimõttel projekteerimine [1]

Tihedusfunktsiooni usaldusväärseks määramiseks on vajalik suur üksikkatsete arv, ühe ehitusplatsi piires ei ole tavaliselt võimalik sellisel hulgal katseid teha, mistõttu antakse need standardites, võttes aluseks paljude eripaikades tehtud katsed nagu on näidatud joonisel 1.9. [1]

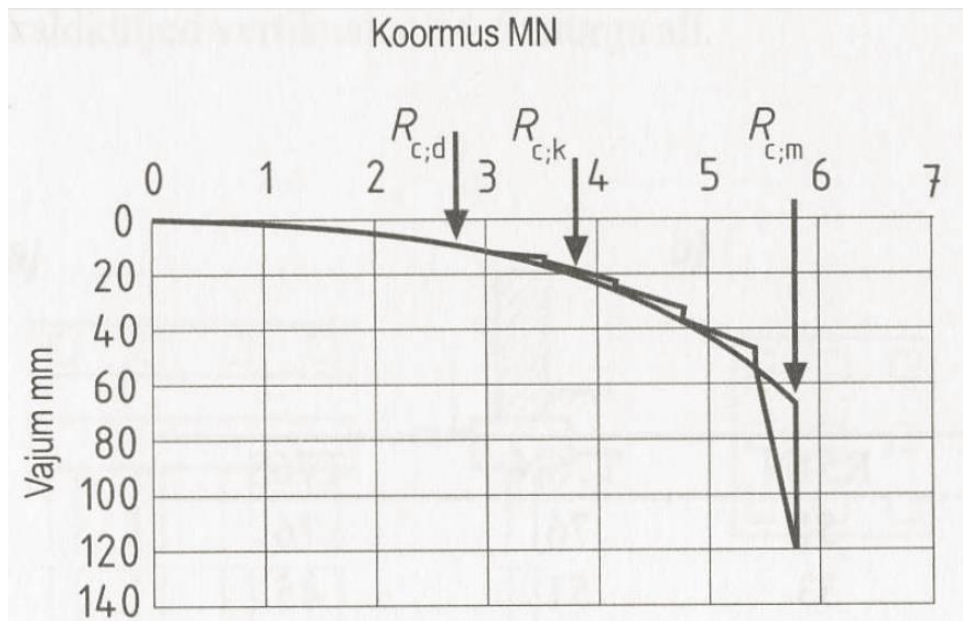




**Joonis 1.9** Vaiade staatiliste koormuskatsetega ja GAPWAP meetodiga määratud kande võime suhe.[1]

Joonisel on andmetööstlusest saadud 377 katset ning koostatud on tulpdiagramm vaia kande võime kohta, mis on määratud paralleelselt staatilise koormuskatsega ja lainelevi mõõtmisega dünaamilisel katsetamisel GAPWAP meetodiga. [1]

Üksikvaia kande võime on osavaruteguriga leitud ka järgmisel koormusvajumi graafikul, mida iseloomustab joonis 1.10 [9]



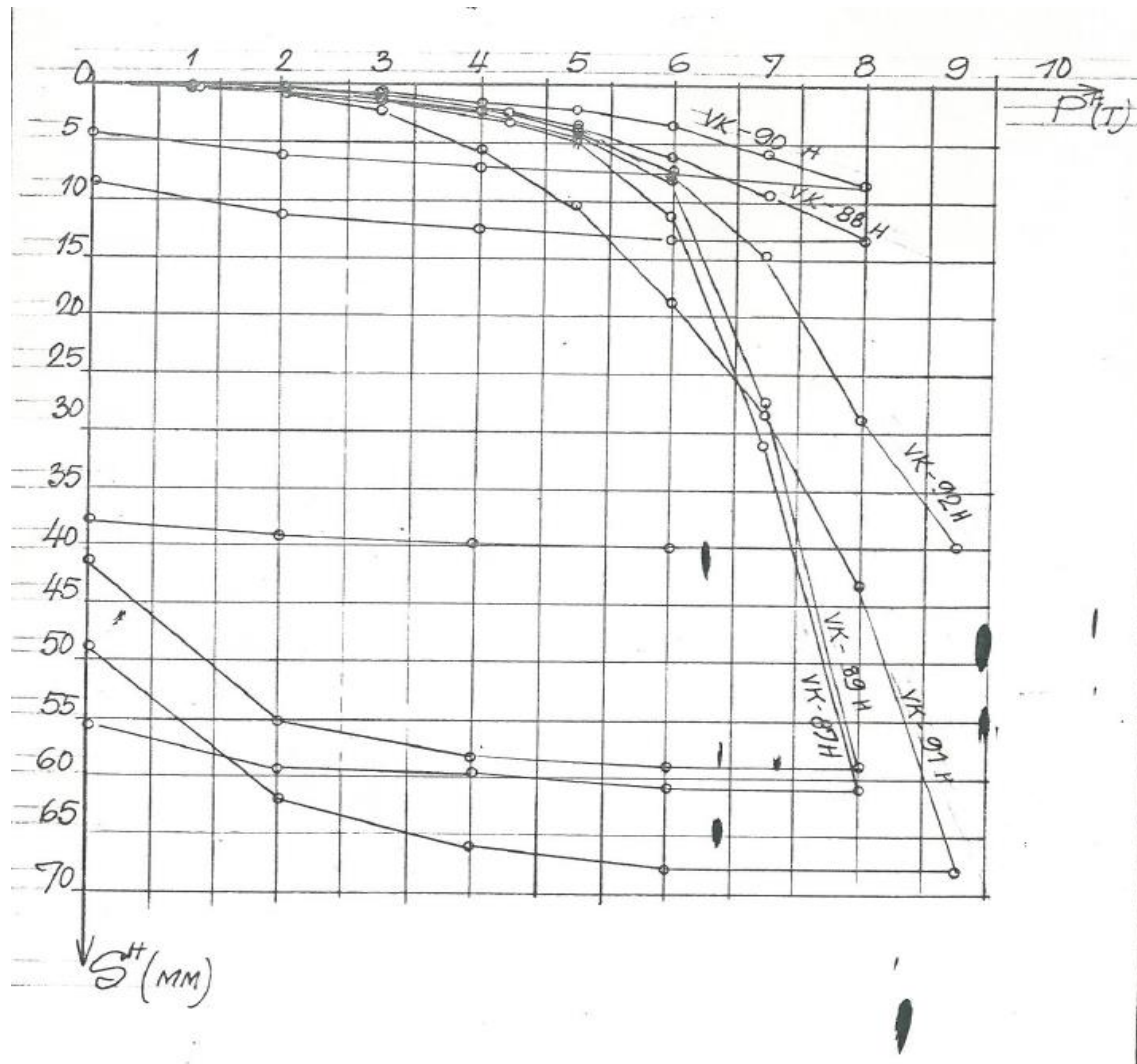
**Joonis 1.10** Vaia staatilise koormuskatsega määratavad piir-, norm- ja arvutuskandevõime [9]

Variante iseloomulike punktide staatilise koormuskatse graafikult välja lugemiseks ja nimetamiseks on erinevaid. Antud töös on vajalik võrrelda saadud piirkoormuseid varasemate uuringutega, mis ei põhine tänapäeval Eurokoodeksil. Seega on kasutatud ka vanemat kasutuselolevat varianti iseloomulike punktide leidmiseks koormusgraafikul, mida on nimetatud ka ajalisuse meetodikaks. Varasemalt kasutati piirpingete meetodeid, kus graafikult loetakse välja nii küljevastupanu piir, proportsionaalsuspiir kui ka purunemispiir. Tänapäevasem variant eeldab aga purunemispiiri järgi norm- ja arvutuskandevõime leidmist osavaruteguritega.

## 1.6 Horisontaal- ja vertikaalkandevõime

Eelnevates peatükkides on mainitud, et kiilvai on võimeline vastu võtma igasuguseid koormuseid, olgu selleks siis horisontaaljõud, vertikaaljõud või hoopis pööre ehk moment. Eestis on katsetatud täissuuruses kiilvaiasid vertikaalsuunal (staatiline koormamine), mida on peatükiks 1.4 kirjeldatud. Horisontaalkoormamist on samuti tehtud kiilvaiadele ja seda „Nursi katsepolügoonil“. Katsepolügoonil tehti 59 horisontaalkoormuskatset, mida viis läbi „EKE Projekt“ Riiklikus Ehitusuuringute Instituudis Tartu osakonnas. Täpsemalt koormati vaiu paariviisiliselt, kus kasutati vaiu üksteisele vastutoena. Enamus vaiu oli eelnevalt

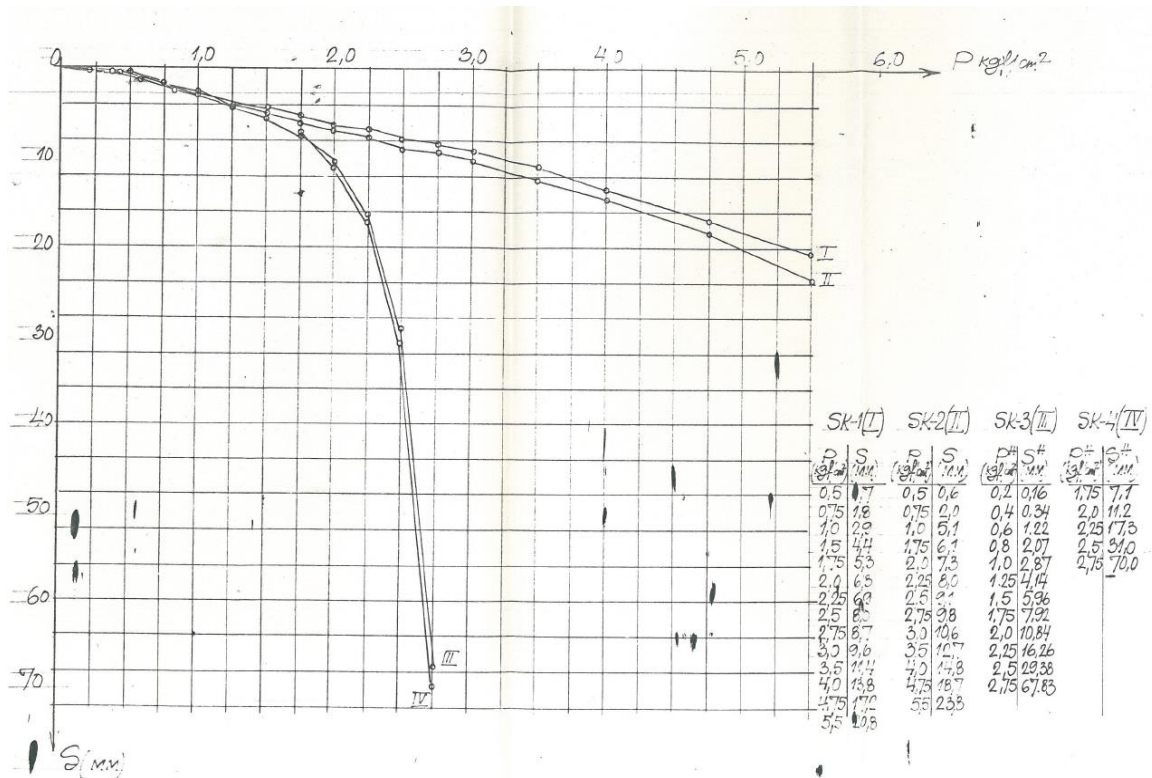
koormatud vertikaalselt. Mainima peab, et horisontaalkoormuskatsetel vertikaalkoormust ega momenti ei rakendatud. Kiilvaia koormati kaldkülje suunas ja tulemustest koostati graafikud, millega saab tutvuda joonisel 1.11. [2]



**Joonis 1.11** Vaiade horisontaalkoormuskatsed [2]

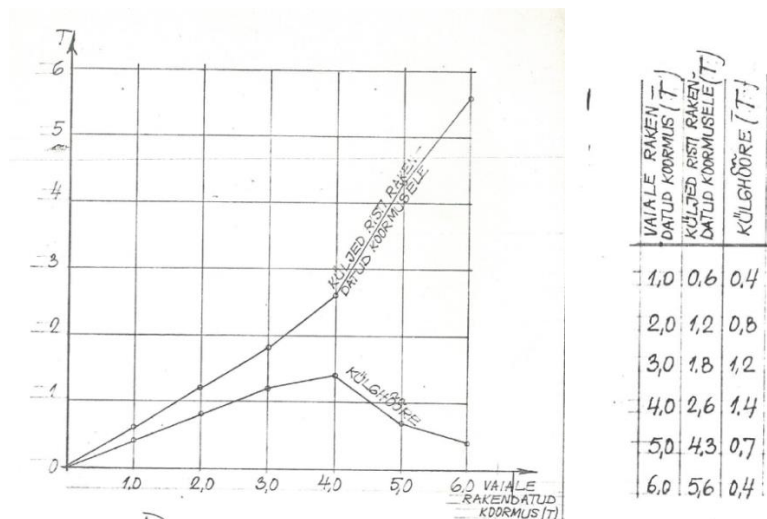
Graafikut tõlgendatakse ka seosega  $U_p = f(H)$ . Graafikul on iseloomulikud murdepunktid, mis näitavad vaia tööd pinnases. Graafikust järeldub, et esimestel koormusastmetel on vaiad 91, 94 ja 97 H kuni 1T. Ülejäänud vaiadel (kuni 2T) on paigutised väga väiksed ja jäävad 0,4 ja 0,7 mm vahele. Paigutised suurenevad mõnevõrra edaspidisel koormamisel, kuid sõltuvuskoormuse ja paigutise vahed jäävad lineaarseks. Kiilvaia horisontaalsel koormamisel peame ületama eelkõige pinnase hõõrdetakistuse, mis tekib kiilvaia kaldpindadel. Koormates vaia maksimaalse hõõrdetakistuseni, mis kaldpinna ja pinnase vahel tekib, saadakse komponent, mille osakaalu hinnatakse vaiale mõjuva tegeliku jõu suhtes. Selle tulemuse aluseks võeti katsetusele betoonplaat ja tehti plaatkoormuskatseid nii

vertikaalkoormusel kui horisontaalkoormusel. Eeldati, et kiilvai on jäik ja pöördub horisontaaljõu korral ümber keskpunkti ning pinnase deformatsioone põhjustav jõud kaldpindadel on võrreldav plaatkoormuskatsetel analoogseid deformatsioone põhjustava jõuga. Plaadikatsete tulemustega saab tutvuda joonisel 1.12. [2]



**Joonis 1.12** Betoonplaadi horisontaalkoormuskatsed [2]

Graafikul on näha, et 5-6mm paigutuste korral on kiilvaia ja plaadi paigutised võrdsed. Arvutuste aluseks võeti reaalse katsete kindlatel koormustel saadud keskmised paigutised. Paigutised, mis jäid üle  $s \frac{H}{3} - e$ , jäeti välja. Nende andmete põhjal arvutati välja mõjuvate koormustega risti olevate külgedega ehk kaldkülgede kandevõime, mis lahutati vaiale antud reaalsest horisontaalkoormustest. Saadud vahet vaadeldi, kui vaia vertikaalkülgede külghõõret. Paremaks mõistmiseks on toodud joonis 1.13. [2]



**Joonis 1.13** Vaia külghöörde sõltuvus vaiale rakendatud koormusest [11]

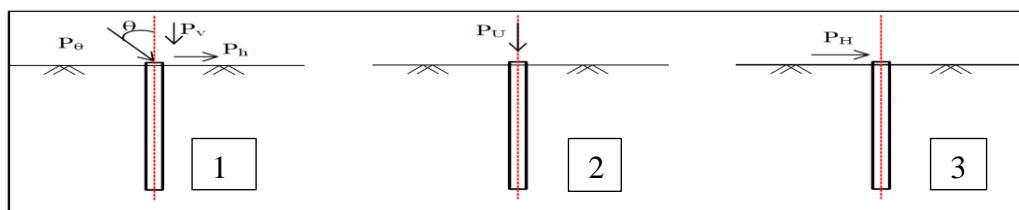
Graafikult selgub, et külghöörde osakaal kogu koormusest kasvab lineaarselt. Jõudes horisontaaljõuni 4 T või 40 kN, moodustades külghöördest 1,4 T. Näeme, et 4 tonni juures hakkab horisontaaljõud vähenema ja külghööre väheneb kuni 6 tonnini ning siis ammendub täielikult. Pinnase vastupanu on ületatud ja pinnas on purunenud. Külghöörde maksimaalväärtus langeb kokku ka surupenetratsioonikatsetel saadud tulemustega. Nendest tulemustest võib järeldada, et kiilvaia horisontaalkandevõime määramisel peab lähtuma  $H_{pr}$  (horisontaaljõul purunemispriirist), mille ületamisel toimub pinnase väljasurumine. [11]

Eestis pole täissuurustega kiilvaid horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul katsetatud. Välismaistes allikates leidub siiski horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul katsetusi, kuid siiski teiste vaiadega. Artiklis „Pile Behavior under Inclined Compressive Loads—A Model Study“, mis on avaldatud 2013 aastal, kus Soumya Royja, Bikash Chandra Chattapadhyay ja Ramendu Bikash Sahu katsetasid 1m\*1m ja sügavusega 0,75 m pinnasekastis terastoru vaiu. Pinnasena kasutati kuiva, pruuni, ühtlaste teradega Mogra liiva. Teras toruvaiade pikkused olid 200, 300, 400 mm ja 20 mm läbimõõduga. Vaiadele rakendati jõudu  $0^0$ ,  $15^0$ ,  $30^0$ ,  $45^0$ ,  $60^0$  ja  $90^0$  nurkade all. [8]

Professorid mainivad, et maailmas on tehtud vähe katsetusi ning üldiselt vähe uuritud vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju vaiadele. Käesolev artikkel pakub vertikaalse vaia mudeli tulemusi kontrollitud tingimustes koormuse nihke ja täieliku vastupidavuse jaoks ning kesksete kalduolevate kokkusurumisejõudude jaoks. Testitulemusi võrreldi olemasolevate piiratud teoreetiliste lähenemistega vaia jaoks kalduoleva kokkusurumisejõu korral. [8]

Vai paigutati vertikaalselt pinnasesse ja rakendati vertikaal- ja horisontaalkoormusi.

Parema ülevaate annab joonis 1.14



**Joonis 1.14** Vaiale rakendavad koormused [8]

Joonisel 1.14 on näha vaiale rakendatavad koormused (1, 2, 3), kus nr 1 juurde kuuluvad tähistused  $P_v$  – vertikaalkoormus,  $P_h$ – horisontaalkoormus,  $\theta$  – nurk,  $P_\theta$ –resultantjõud. Number 2 juurde kuuluvad tähistused  $P_u$  – staatiline kandevõime ning number 3 juures esineb tähistus  $P_H$ – horisontaalkandevõime.

Professorid katsetasid miniatuurseid vaiu lääne Bengalis, Indias, kus nad konstrueerisid vastava seadme selleks, et rakendada jõudu erinevate nurkade all. Nende töö eesmärk oli võrrelda erinevate valemite kehtivust ja võrrelda katsetulemuste andmeid, mida kuulsad vaiade uurijad omal ajal tegid J.B. Hansen (1970), Muhs and Weiss (1973), George Geoffrey Meyerhof (1973). [8]

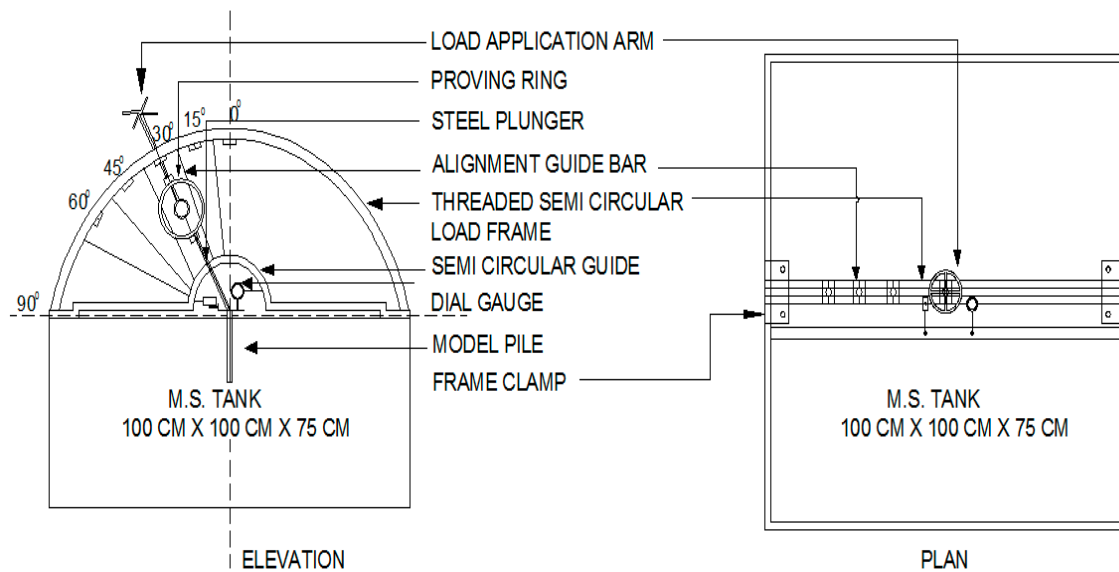
George Geoffrey Meyerhof uuris 1972. aastal üksikvaiale rakendatud hilisemaid koormusi, mis mõjusid kaldu. Meyerhof leidis, et staatiliselt koormatud vaiad, mis on täielikult surutud pinnasesse ja mis on hilisemalt koormatud vertikaal- ja horisontaalkoormustega, annavad kalduoleva koormuse. Ta väljendas seda olukorda empiirilise valemiga. [8]

*Meyerhof'i* valem [8]:

$$\left(\frac{P_v}{P_u}\right)^2 + \left(\frac{P_h}{P_H}\right)^2 = 1, \quad (3)$$

kus  $P_v$  – vertikaalkoormus;  
 $P_h$  – horisontaalkoormus;  
 $P_u$  – staatiline kandevõime;  
 $P_H$  – horisontaalkandevõime.

Autorid katsetasid vaiasid konstrueeritud seadmel, mis on esitatud joonisel 1.15



**Joonis 1.15** Konstrueeritud katseseade pinnasekasti [8]

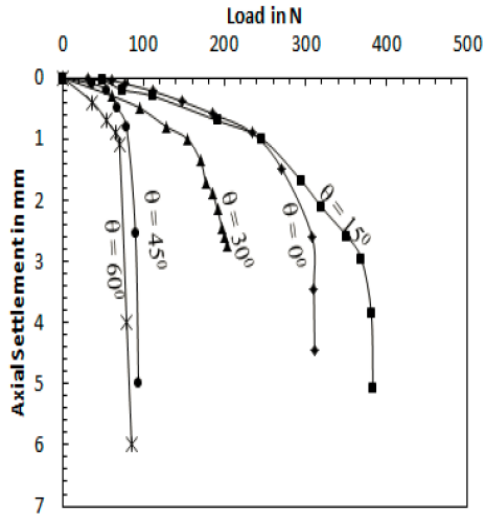
Jooniselt näeme, et kaarekujuline raam on kinnitatud pinnasekasti. Ülevalt alla on loetletud katseseadme detailid: käsitsi keeratav koormus (mida on võimalik paigaldada vastava kraadi alla), tõendusring, terasest kolb, kinnitatud juhtplaadid, keermestatud poolring (mis võimaldab koormust taluda), juht poolkaar, mõõteandurid, mudelvai, raami kinnitus. [8]

Vaia ülemise otsa vertikaalsed ja horisontaalsed nihked mõõdeti mõõtuuri tundlikkusega 0,002 mm. Koormusi rakendati vähehaaval, kuni saavutati vaia ülim kandevõime järgneva väikese juurdekasvuga kasutatud koormusel. Selleks, et kontrollida tulemuste korratavust, teostati enamik teste kolm korda. Lisaks viidi veel läbi mõned testid lahtise liiva kogumiga, hoides liiva 31 kraadi juures täpseks võrdluseks teoreetiliste väärtustega. [8]

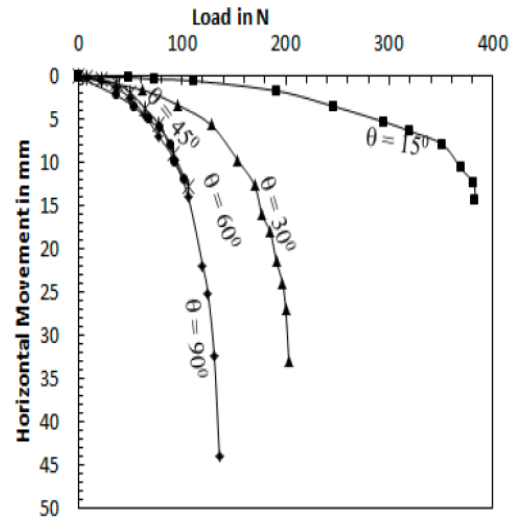
Katse tulemustest joonistati välja graafikud. Graafikud on esitatud paarikaupa, kus ühes graafikus näidatakse vertikaalset paigutust, teises graafikus horisontaalset siiret. Joonisel 1.16 on esitatud katsetulemuste põhjal graafikud. [8]



Vai ( $d = 20 \text{ mm}$ ,  $L = 400$ )



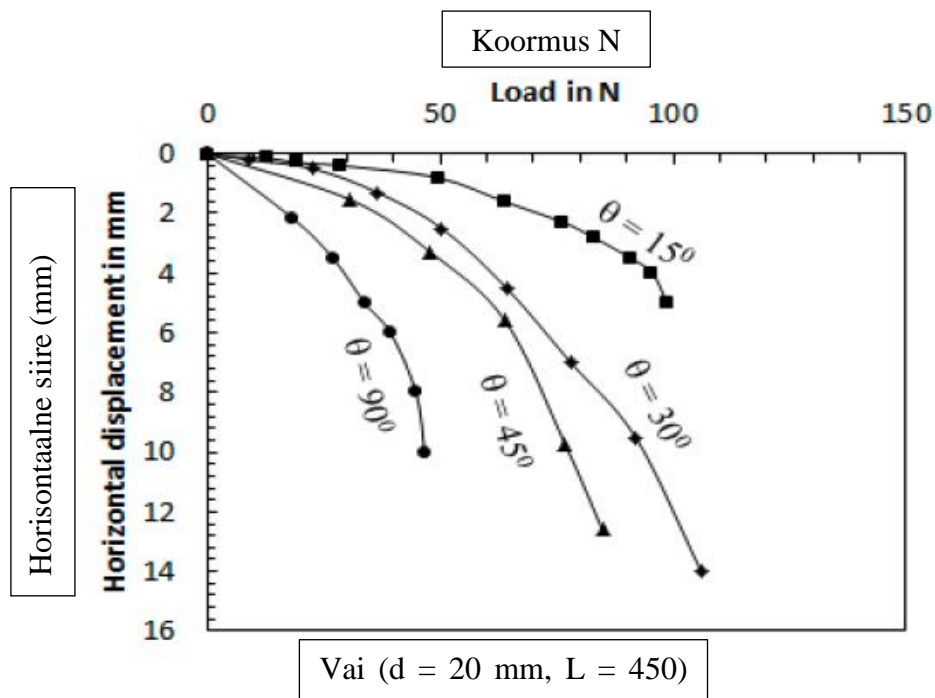
Vertikaalne paigutus



Horisontaalne paigutus

**Joonisel 1.16** Koormus võrrelduna vaia paigutuse suhtes [8]

Graafikutelt näeme, et erinevate nurkade alt koormatud vai on paigutunud vastavalt telje suundadel. Vertikaalsed paigutised ei ületa graafikul 1cm olenemata nurgast, vaid jäävad pigem 5mm juurde. Samuti rakendatav maksimaalne jõud vaiale on 392N. Graafikutelt näeme, et  $15^\circ$  nurga all rakendatud koormuse korral on vaia kandevõime kõige suurem. Järgnevalt on toodud välja horisontaalkoormusgraafik (joonis 1.17). [8]



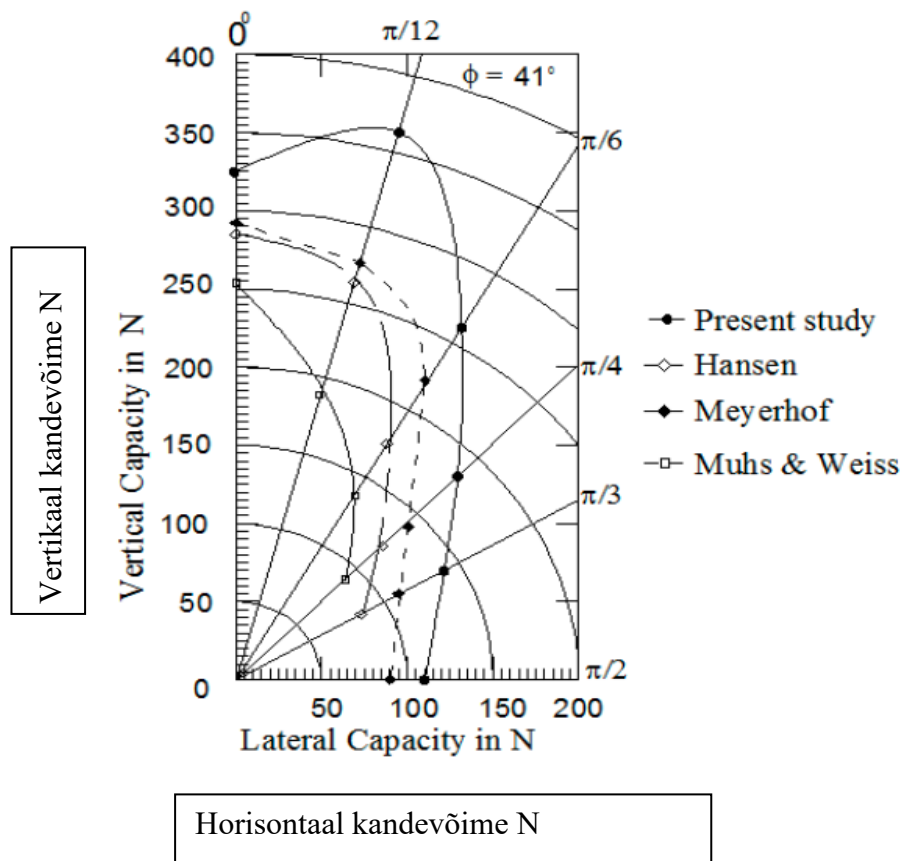
Vai ( $d = 20 \text{ mm}$ ,  $L = 450$ )

**Joonis 1.17** Horisontaalkoormusgraafik [8]



Graafikult näeme vaia horisontaalseid paigutusi erinevate kaldu olevate koormuste korral. 15 kraadise nurga all koormatud vaia horisontaalpiirkandevõime võib lugeda 100N juurde, kus paigutis on 5mm. Proportsionaalsuspiiri võib lugeda sama kraadi juures 50N juurde. Kõikide katsete juures on näha, et graafikul paiknevad jooned on kõverad. Sarnaselt võib iseloomustada teiste nurkade all tehtud katseid. [8]

Järgnevalt võrdlevad autorid töös saadud katsetulemusi erinevatest teoreetilistest lähenemistest, mida on välja pakkunud vaiade uurijad: Hansen, Meyerhof, ja Muhs&Weiss. Olemasolevast uuringust on tuletatud väärtuse tavaline skeem.  $P_0$  on joonestatud skeemina rakendatud kaldkoormuse vastu, kasutades polaarset diagrammi, et anda ulatuslik käsitus kalde mõjust ja et lihtsustada võrdlevat uurimust käesolevast testist saadud tulemustest mitmete teiste autorite teooriatega. Antud skeemi iseloomustab joonis 1.18. [8]



**Joonis 1.18**  $P_0$  olemasoleva uurimuse põhjal vs  $P_0$  teoreetilistest meetoditest  $L/d=20$  vaia jaoks tihedas liivakihis [8]

Antud graafikul on teiste autorite (Hansen, Meyerhof, Muhs&Weiss) tulemused arvutatud teoreetiliste valemite abil ja lisatud graafikule. Autor on lisanud 400 mm pikkuse ja 20 mm läbimõõdu ( $L/d = 20$ ) katsetuste põhjal saadud andmed samuti graafikule ja esineb tingimärgina „Present study”. Katsetel kasutatud nurgad  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ja  $90^\circ$  on esitatud graafikul sümbolina  $\pi$ , mis tähistab graafikul  $180^\circ/n$ . [8]

Polaarsed skeemid näitavad ka, et kõikidel teoreetilistel lähenemistel on alahinnatud kaldkoormuse vertikaalse ja horisontaalse koormusekomponentide mõju. Seega ilmneb vaiamaksimaalne koormuse kandevõime koormuse kaldel väärtusega 15 kraadi ( $\pi/12 = 180/12$ ), mis ei peegeldunud eelnevates uuringutes. Olemasoleva uurimuse polaarsed diagrammid näitavad, et kõik teoreetilised lähenemised on minimeerinud kalduoleva koormuse vertikaalsete ja horisontaalsete koormusekomponentide mõju. [8]

## **1.7 Lühidalt varasemalt tehtud kiilvaiuuringutest**

Täissuuruses kiilvaiade uuring on läbi viidud Riikliku Ehitusuuringute Instituudi (REI) poolt 1987. aastal. Eesti eri paikades ja erinevates pinnastes uuriti ligi 200 kiilvaia. Kiilvaia katsetused on tehtud moreenpinnases, kuid ka liivas, millest koostati suur hulk graafikuid iseloomustamaks täissuuruses kiilvaiade käitumist. [12]

Erko Varese kirjutatud töös „Kiilvaimodelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused” (2014) uuriti labori pinnasekastis miniatuursete kiilvaimodelite kandevõimet liivpinnases ja pinnases toimuvaid muutusi vaia süvistamisel. Katseid teostati kahes erineva tihedusega liivpinnases ja kolme erineva kujuga kiilvaimodeliga. Eesmärke oli mitmeid, sooviti võrrelda kiilvaimodelite käitumist täissuuruses vaiadega ning uurida, kas hetkel ehituses peamiselt kasutatavate kandevõimevalemite (Gersevanovi ja Gate-Killari valemite) hinnangud sobivad ka mudelite puhul kandevõime hindamiseks. Lisaks prooviti tõestada pinnase võimalikku tihenemist kiilvaia maasse rammimisel, mistõttu uuriti ka pinnase väljasurumist ja vertikaalset tõusu. [13]

Kiilvaiadest Lõuna-Eesti moreenpinnases on 2003. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis Mait Metsa juhendamisel magistritöö kirjutanud Olavi Tammemäe. Töös on kirjutatud Eesti moreenpinnaste omadustest ja nende levikualast. Selgitatud on kiilvaiade kandevõime arvutamist moreenis. Kokkuvõttena on leitud, et kiilvaivundament on Lõuna-Eesti

moreenpinnastes säästlik alternatiiv teistele madalvundamentidele ning säästab tööjõu ja materjali kulus kuni 60%. Töös tuuakse välja, et kiilvaia kandevõime sõltub rammimisaegsetest pinnase omadustest. [10]

AS Kurmik arendab jõudsasti kiilvaiadega sobituvaid postisõlmi ja rostvärke. Lisaks tegeleb mudelkatsetustest saadud info põhjal kiilvaiade arendamisega. [5]

AS Geotehnika inseneribüroo poolt on 2001. aastal tehtud geotehniline aruanne „Kiilvaiade staatiline koormamine Tallinnas, Lootsi tänaval 5/7 Norde Centrum maa-alal“.

„Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine Nursi katsepolügoonil“ (1987) koostas geoloogilise uurimistöö aruande Projekteerimise Instituut, mille nimeks oli „EKE Projekt“. Pikemalt on sellest juttu peatükis 1.6. Viidi läbi 59 kiilvaia horisontaalkandevõime katset. Leiti võrdlusi ja seoseid. Töö eesmärgiks oli kiilvaiade horisontaalkandevõime hindamiskriteeriumite väljaselgitamine vaiade kaldkülgede suunas mõjuvate horisontaaljõudude mõjul vertikaalkoormusi kasutamata. [2]

Erik Varese kirjutatud töös 2015. aastal „Kiilvaialuse kandevõime kujunemine ja käitumishinnang“ võrreldi plaadi, kiilvaiade ja erineva vaiarvuga vaialuste kandevõimeid.

Tõnis Kulli kirjutatud töös 2014. aastal „Vaialuse kandevõime“ kontrolliti väidet, mille kohaselt vaiade kasutamine kindlates kohtades plaadi all vähendab võrreldes vai- ja plaatvundamendiga vajumisi ja tõstab vundamendi kandevõimet, selle tõele vastamist.

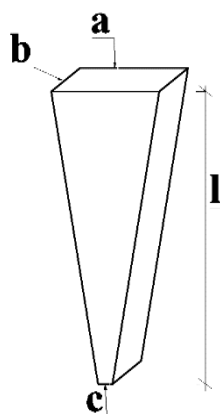
Meelis Linde poolt käsitletud diplomipraktika teema („Kiilvaia horisontaalkandevõime“ 2016) raames võrreldi erinevate suurustega kiilvaide horisontaalkandevõimeid.

## 2. MATERJAL JA METOODIKA

### 2.1 Kiilvaimudelite kirjeldus

Katsetuste käigus kasutati kiilvaimodelit, mis on kahemeetrise toodetava kiilvaia viiekordne vähendatud mudel. Mudelkiilvai on tehtud terasest ja tema tähis on KV40/6T (tähis T tähendab terasvaia). Teised tähised: KV- kiilvai, 40 – pikkus cm, 6- paksus cm ja kaalus 6086 g. Mudeli suurus valiti samuti pinnasekasti mõõtmetest olenevalt, kuna selle teraskest ei tohtinud pinnasedeformatsioone mõjutama hakata. Mudel ja mõõtmed on välja toodud joonisel 2.1. Valmis mudeliga saab tutvuda joonisel 2.2.

**Joonis 2.1.** Kiilvaimodeli mõõtmed



TÄHIS	MÕÕTMED (mm)			
KV40/6T	a=120	b=60	c=16	l=400 mm



**Joonis 2.2** Mudelkiilvaia (KV40/6T) ots ja pealtvaade

Vaia peale oli keermestatud viis auku, keermestatud aukude läbimõõdud on 8 mm, aukude asukohad on valitud täpselt nii, et saaks paigaldada koormuskatsetele sobilik post. Pärast paigaldatud post peab jääma vaia suhtes igati tsentrisse. Posti kinnitamiseks kasutame nelja keermestatud ava, viies keermestatud ava on vaiapea suhtes puuritud tsentrisse, et dünaamilisel katsel oleks võimalik juhtvarrast kinnitada. Olgu öeldud, et terasmudelvaial on

külghõõrde takistus väiksem kui sarnasel betoonmodelvaial. Tuginedes katsetustele modelbetoonvaia ja terasmodelvaiaga, võib öelda, et külghõõrde takistuse vahe on ligikaudu 6%. See tundub loogiline, sest betoonpind on krobeline, kuid terasvai sile.

## 2.2 Katsetel kasutatud pinnase kirjeldus

Katselabori pinnasekastis oli pestud ja sõelutud peenliiv. Varasemates töödes on pinnast üksikasjalikult kirjeldatud, seepärast toon välja ainult põhilised pinnase omadused. Uuringute käigus määrati liiva lõimis, veesisaldus, tihedusaste ja nihketugevus. Standardi EVS 1997-1:2003 alusel liigitati pinnasekasti liiv peenliivaks, liiv on väga ühtlane. Looduslik veesisaldus on  $w_n = 2,4\%$ , liivpinnase tihedusomadused Standard - Proctorteim järgi näitas keskmiseks maksimaalseks tiheduseks  $\rho_{dmax} = 1,59 \text{ g/cm}^3$  ja Terzaghi puhul  $\rho_{dmax} = 1,64 \text{ g/cm}^3$  ning  $\rho_{dmin} = 1,39 \text{ g/cm}^3$ . Poorsustegur tihedaimas olekus  $e_{min} = 0,62$  ja kohevaimas olekus  $e_{max} = 0,92$ . Nihketeimi katsete põhjal saadi pinnase sisehõõrdenurgaks  $\phi = 31$  kraadi ja nidususeks  $c = 3 \text{ kPa}$ . Pinnaste omadusi saab täpsemalt vaadata tabelist 2.1[4]

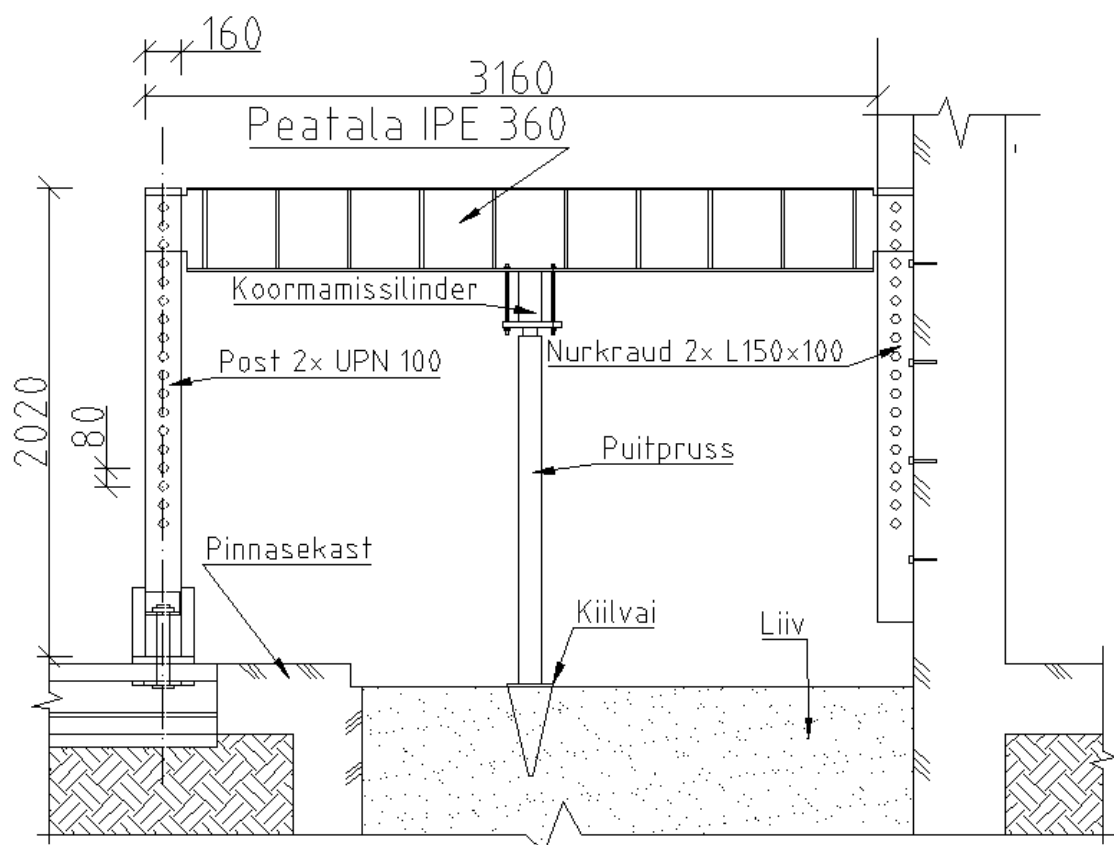
**Tabel 2.1.** Katsetel kasutatud pinnase lõimise jaotumine fraktsiooni läbimõõdu järgi [4]

	Fraktsiooni läbimõõt mm, sisaldus %																
	Veeris	Kruus				Liiv				Möll				Sau		C <sub>u</sub>	
Pinnas		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen		Jäme	Kesk	Peen					
EVS 1997-1:2003	>60	60...20	20...6	6...2	kokku	2...0,6	0,6...0,2	0,2...0,06	kokku	0,06...0,02	0,02...0,006	0,006...0,002	kokku	<0,002	<0,06	<0,002 / <0,06	d <sub>60</sub> / d <sub>10</sub>
peenliiv	0	0	0	0	0	0,7	35,8	62,4	98,9	0,8	0,1	0,1	1,0	0,1	1,1	9,1	1,9

## 2.3 Katseseadmestik

### 2.3.1 Pinnasekast ja talastik

Mudelvaia katsetused viidi läbi pinnase kastis, mis oli täidetud liivaga. Pinnase kast on sisemõõtmetelt  $3,5 \times 2$  meetrit pikk. Sügavust ei mõõdetud, kuid see oli piisav valitud suurusega mudelite katsetamiseks. Pinnasekasti kohal oli monteeritud kiilvaiade koormamiseks talastik, millega saab tutvuda joonisel 2.3.



**Joonis 2.3** Pinnasekast ja talastik

Talastik koosnes ühest põrandale kinnitatud postist, kahest seinale kinnitatud L-kujulisest nurkrauast ja nende külge ühendatud poltliidetega peatalast. Kahest UPN 160 talast, mis kinnitusid põrandale ja ühest seina külge kinnitatud L-profiilis talast, mis olid mõõtmetelt  $150 \times 100$  mm, nende ühendusena oli kasutatud peatalana IPE360 terastala. Nurkraudad olid kinnitatud betoonseina külge M16 keermelattidega. Peatala kinnitus poltidega nurkraua ja UPN posti vahele, mis oli paigaldatud suurimale võimalikule kõrgusele. IPE360 terastala külge monteeriti raam survesilindri kinnitamiseks. Silindrilt vaiale kandis survet üle puitpruss. Puitprussi ristlõike mõõtmed valiti piisavad, et koormuste juures mitte välja

nõtkuda. Sellisel katseseadmel tehti kolm staatilist katset, et teada saada kiilvaiamudeli kandevõime. Nende katsetulemustest on räägitud peatükiks 4.

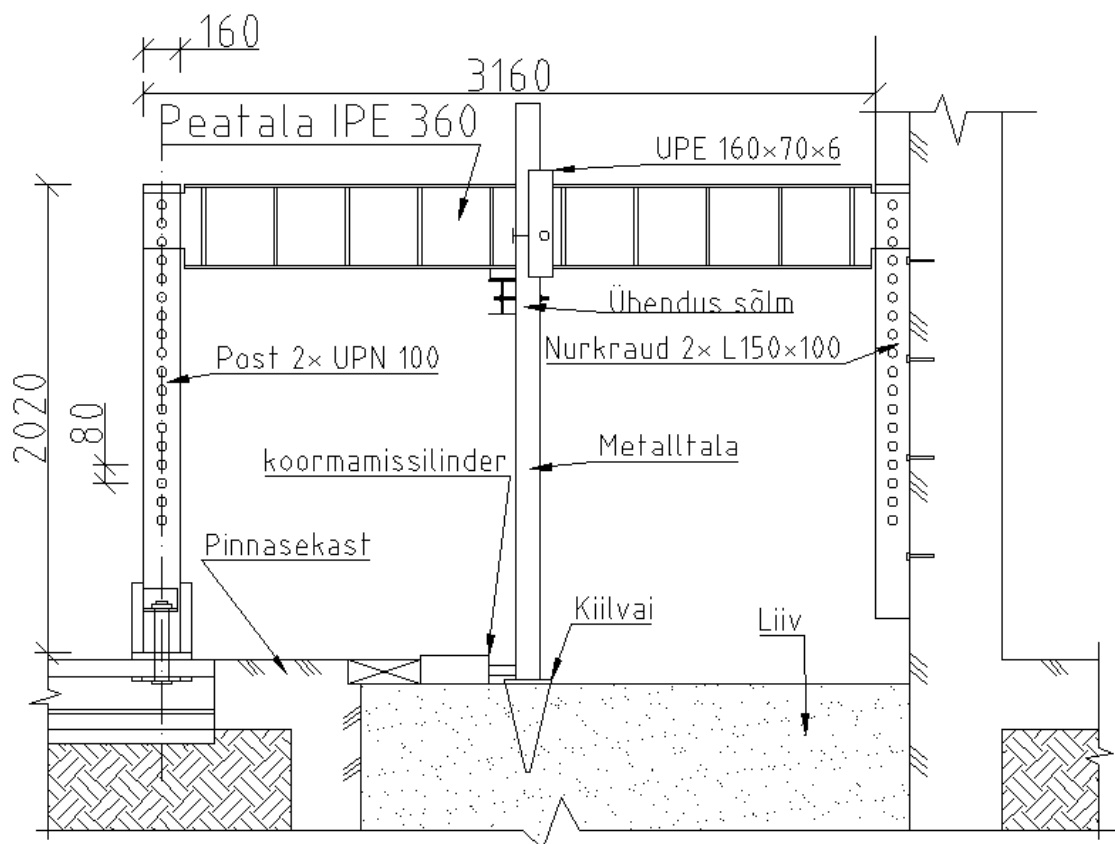
Pärast neid katseid monteeriti lisatalastik, mis võimaldas läbi viia nii staatilisi koormuskatseid, kui horisontaal- ja vertikaal koormuskatseid. Eelnevalt eemaldati talastikust terastala külge monteeritud raam koos survesilindriga ning puitpruss asendati terasest postiga. Postiks kasutati terasest nelikanttoru, mille mõõtmed on 120x60x4 ja pikkus 2500mm. Posti alumises otsas oli kinnitussõlm, mis võimaldas ühendada omavahel mudelvaia ja posti (postiking) (vt joonist 2.4).



**Joonis 2.4** Postikinga ja vajaühendus

Postikingale oli puuritud 10 ava, millest nelja ava korral kasutati poltühendusena M8 polte. Lisaks paigaldati koormamissilinder pinnasekasti. Täpsemalt saab täiendatud talastikuga tutvuda joonisel 2.5.

### 2.3.2 Kangpressi ülekande mehhanism



**Joonis 2.5** Täiendatud talastik

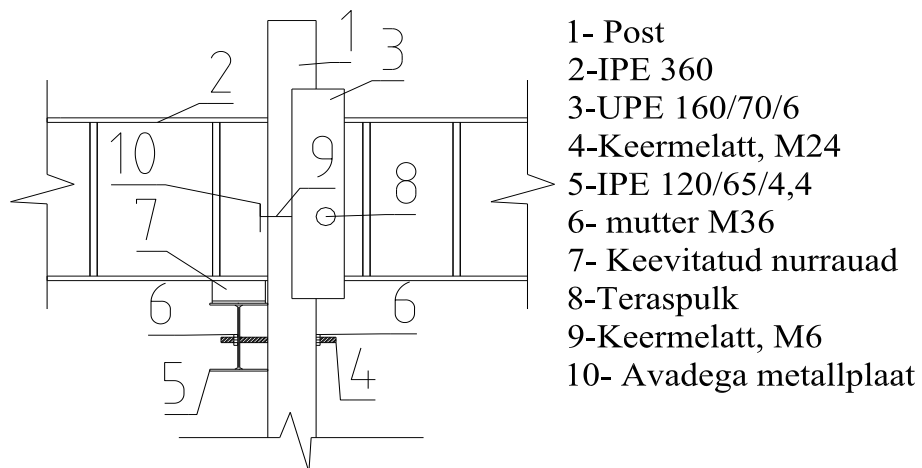
IPE360 terastala külge monteeriti UPE 160x70x6, mille pikkus on 500 mm. Karprauast olid läbi puuritud avad ja avast oli läbi pandud teraspulk, mis lubas postil vabalt liikuda x ja y sihis, kuid z -telie sihis oli pööre minimaalselt lubatud. Lisaks hoidis karprauda läbipandud pulk, millel olid omakorda avad ja avadest läbipandud 6 läbimõõduga keermelatid, mille vastuseks oli aukudega metallplaat, mis hoidis posti ümber kukkumast juhul, kui katsetuskäigus pinnas puruneb ja siire on piisavalt suur, et post oma raskusega ümber kukuks (vt joonist 2.6).





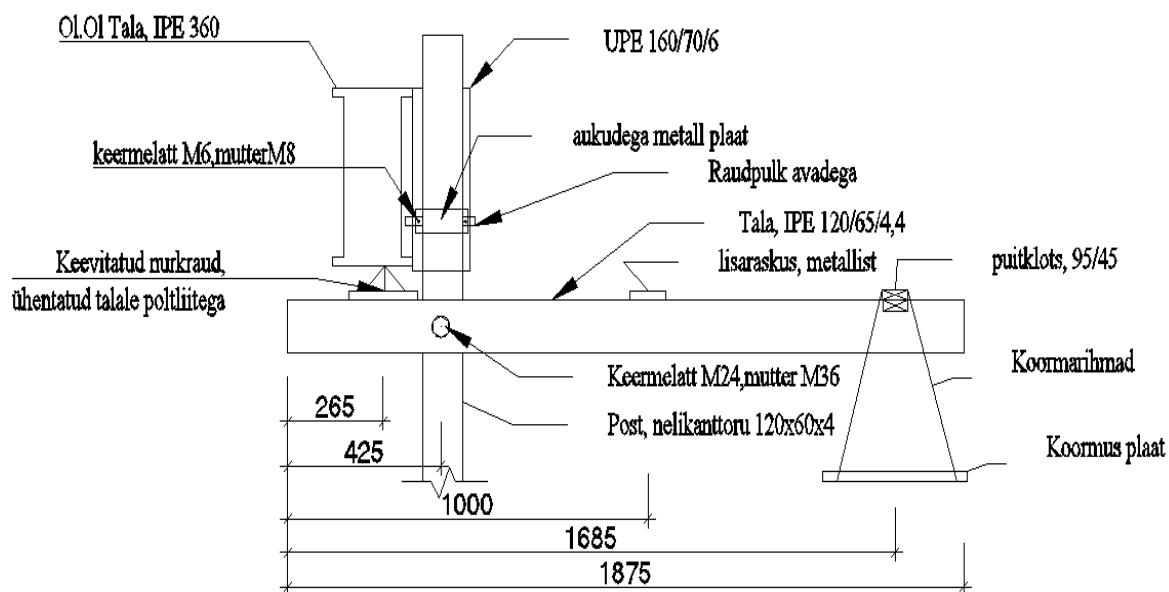
**Joonis 2.6** Posti ülemise osa kinnitussõlm

Talastiku all käsitletakse ka koormamisseadet, kuna seadeldis on kinnitatud poltühendusega posti külge. Kogu katseseadmest ja talastiku kokku ühendamiseks on sisukamalt räägitud tegevuskavas. Pöördumist võimaldav ülemine tugi, mis on esitatud joonisel 2.7.



**Joonis 2.7** Pöördumist võimaldav ülemine tugi

Samuti on esitatud kangpressi ülekande mehhanism, vertikaalse koormuse tekitamiseks (vt joonis 2.8).



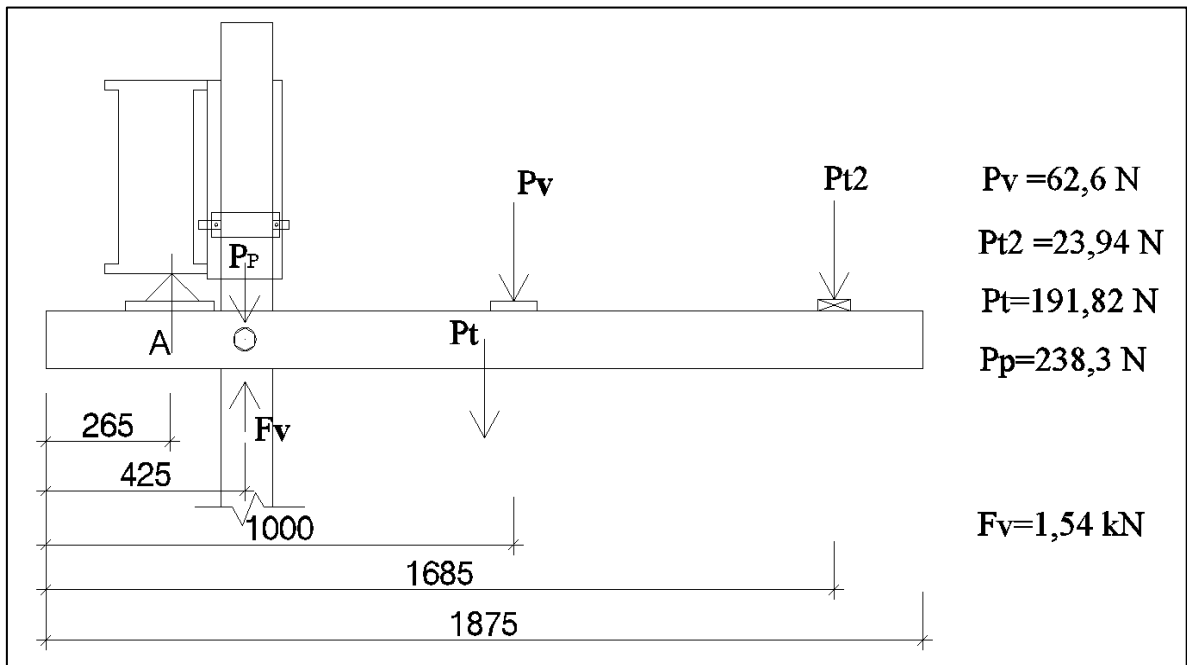
**Joonis 2.8** Kangpressi ülekande mehhanism

### 1. Katseseadme kirjeldus

Kolmelt staatiliselt tehtud katselt saadi teada mudelvaia kande võime, milleks oli ligikaudu 10kN. See on ligikaudu 1020kg. Ühe ja enam tonni riputamiseks katsevaiale tehti nn kangi süsteem, mis oleks ligikaudu 10 kordse võimendusega. See tähendab seda, et süsteemile oleks vaja riputada ligikaudu 100kg koormust. Selleks, et teada saada vaiale mõjuv jõud, tuli koostada arvutuskeem sisejõudude määramiseks.

Talale IPE (120×60×4,4) pikkusega 1875mm ja tähisega Pt puuriti vasakpoolsest otsast 425mm kaugusele 24mm läbimõõduga ava, kust käis keermelatt läbi. Tala kinnitamiseks pandi keermelatile otsa M36 mutter ja keerati vaba käega kinni. Talale lisati lisakoormus tähisega Pv vasakpoolsest otsast 1000mm kaugusele. Lisakoormus asetati mõõdu suhtes keskele ja kinnitati teibiga. Talale paigaldati puitklotsid tähisega Pt2, mis olid kinnitatud kruvidega. Puitklotsi kaugus vasakust otsast prussi keskohta on 1685mm. Puitklotsile on arvestatud juurde koormarihmade kaal ja neid on 2. Nagu mainitud, siis tala kinnitub postile, seega tuleb arvestada posti kaalu sisse ka keermelatt ja mutrid. Post koos mutritega on tähistatud joonisel tähisega Pp.

Lõikes A paiknev vinkelraud, mis on keevitatud alusplaadi külge ja kinnitatud poltide abil tala külge, täites ülekande rolli, kuna tema toetuspind IPE 360 talale on piisavalt väike. Vinkelplaadi kaal on arvestatud talakaalule juurde. Kõik detailid on kaalutud ja lisatud arvutusskeemi. Kogu süsteem ja katseseade sai kalibreeritud kaaluga, kui seade oli kokku monteeritud. Arvutuslikult sai arvutatud, et katseseade annab ülekandega vaiale 1,54kN (vt joonis 2.14). Kogu süsteemi kontrolliti kaaluga, mis paigaldati vineerplaadiga pinnasekasti. Vineerplaat on vajalik selleks, et kaal ei vajuks koormuse rakendamisel liiva sisse. Pärast katseseadme monteerimist ja posti alla kaalu paigaldust näitas kaal 150,5kg, mis on 6,5kg vähem arvutatust. Sellega saab väita, et kogu süsteemi ehk katseseadme viga on 1-4% ehk 96% tõenäosusega on katseseade usaldusväärne. Lõpliku seadme ülekande tegur on 8,87.



**Joonis 2.14** Skeem sisejõudude määramiseks ( $P_v$ - lisakoormus,  $P_{t2}$ - puitprussid,  $P_t$ - tala,  $P_p$  – post ,  $F_v$  – vaiale mõjuv jõud)

Leiame momentide tasakaalu tingimusest vaiale mõjuva koormuse  $F_v$ .

$$\sum M_A = 0: P_p \cdot (0,425 - 0,265) + P_t \cdot (1,875/2 - 0,265) + P_v \cdot (1 - 0,265) + P_{t2} \cdot (1,685 - 0,265) - F_v \cdot 0,16 = 0$$

$$F_v = \frac{P_p \cdot (0,425 - 0,265) + P_t \cdot \left(\frac{1,875}{2} - 0,265\right) + P_v \cdot (1 - 0,265) + P_{t2} \cdot (1,685 - 0,265)}{0,16} = 0$$

$$F_v = \frac{238,3 \cdot (0,425 - 0,265) + 191,8 \cdot \left(\frac{1,875}{2} - 0,265\right) + 62,6 \cdot (1 - 0,265) + 23,94 \cdot (1,685 - 0,265)}{0,16} =$$

1,54 kN

Ilma täiendava koormuseta mõjub vaiale 1,54kN.

Protokolli märgiti vajum katse alguses, 2 ning 5 minuti möödudes.

Koormusastmetel mõjuvad koormused arvutati järgmiselt.

$$F_v = 1,54 + X \cdot 8,875, \quad (4)$$

kus 1,54 – koormamisseadme omakaal;

X – Koormusastme kaal kN;

8,875 – kangpressi ülekandearv.

Koormusastmete jaoks koostati tabel 2.2

**Tabel 2.2** Koormusastmed

Koormusastme nr	Lisakoormuse mass kg	Koormusastme mass kg	Koormusastme kaal kN	Koormus vaiale kN
				1,54
1	15,31	15,3	0,15	2,88
2	14,88	30,2	0,30	4,20
3	14,86	45,1	0,44	5,55
4	14,78	59,88	0,57	6,75
5	14,82	74,82	0,73	8,04
6	14,91	87,93	0,86	9,34
7	14,88	104,61	1,02	10,64
8	14,35	118,96	1,16	11,89
9	14,78	133,74	1,31	13,17
10	14,84	148,58	1,46	14,47
11	14,96	163,54	1,60	15,77
12	14,8	178,34	1,75	17,06

### 2.3.3 Mõõtmis- ja koormamisseadmed

Dünaamilise koormuskatse jaoks kasutati löökkkoormusseadet, mis oli valmistatud terasest. Seade koosnes vasarast, raskusketastest ja käepidemest. Raskuseid sai vajadusel eemaldada 2,5kg võrra vähemaks, kõikidel katsetel kasutati 7,5kg vasarat. Vasara keskel on ava, millest käib läbi juhtvarras. Juhtvarras kinnitub keermestatud viisil vaia külge selleks, et vasar vaia vertikaalselt tsentrisse rammiks. Vai koos löökkkoormusseadmega on näidatud joonisel 2.9.



**Joonis 2.9** Vai koos rammimisseadmega

Kasutati vaste mõõtmisel abivahendiks laserloodi Bosch PCL 10, mis leidis kasutust dünaamilise katse vastete ehk ühest löögist tekkinud vajumi mõõtmisel. Katseandmete salvestamiseks kasutati ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteemi, millega mõõdeti horisontaalkoormusel siirdeid kui ka vertikaalkoormamisel tekkivat vajumit. Lisaks näitas aparaat survesilindris olevat rõhku bar-des ja vastavalt kalibreerimisgraafikule teisendati rõhk ümber kilonjuutoniteks. Mõõteseade leiab joonisel 2.10.



**Joonis 2.10** ALMEMO 5690-2 AHLBORN andmesalvestuse süsteem

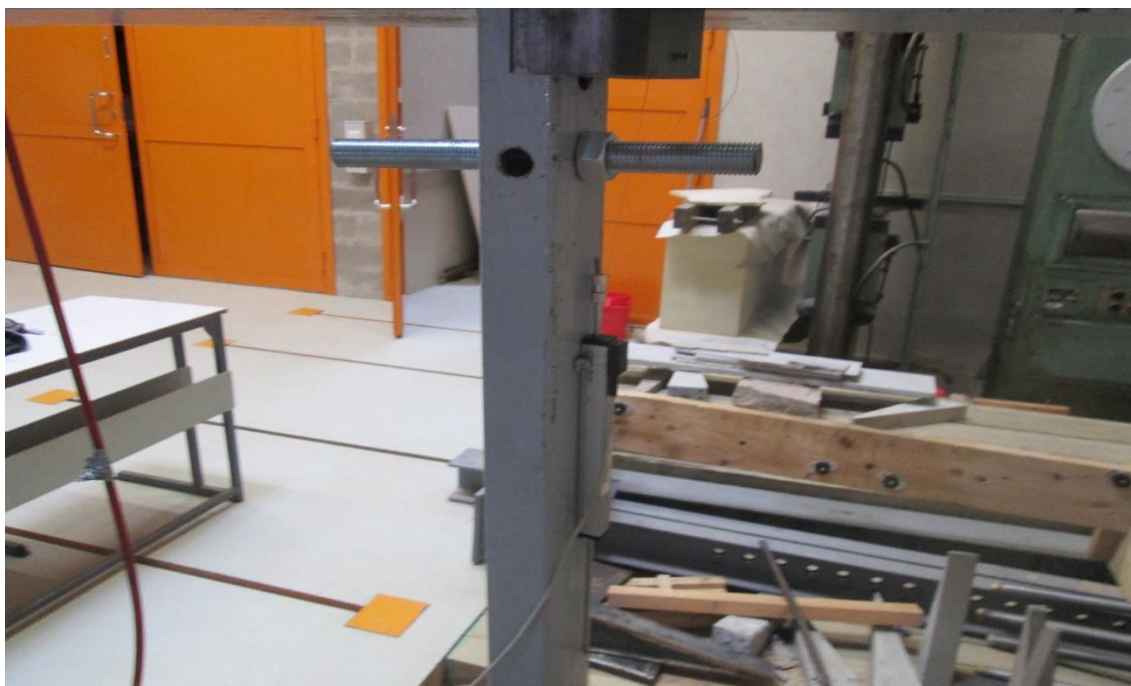
Nagu joonisel 2.10 näha, salvestab seade kolme anduri muutumistulemusi, kus 01 mõõdab vertikaalvajumit, 03 mõõdab rõhku, mis survekatseseadmel tekib ja 05 mõõdab horisontaalliikumise siiret. Kiilvaimudelite horisontaalkoormamiseks kasutati hüdraulilisel õlisurvel töötavat survekatseseadet Lukas LZM 25/200, mille maksimaalne jõud on 250 kN ja silindri käik 200mm. Koormuskatsetel vajumite ja siirete mõõtmiseks kasutati ALMEMO FWA100T AHLBORN siirdeandureid, mille mõõtmistäpsus on 0,01mm. Staatilisel koormuskatsel kasutati ühte siirdeandurit, mis mõõtis vajumit. Horisontaal -ja vertikaalkoormamisel kasutati kahte siirdeandurit, mis mõõtsid vajumit ja siiret. Siirdeandurid paigaldati selliselt, et nad mõõdaksid vaia liikumist pinnases. Selleks pandi horisontaalsiirdeandur eraldi konstruktsioonile ja vajumit mõõtev andur kinnitati postile. Horisontaalsiirdeanduri varda ots paigaldati vastu posti, andur ise oli kinnitatud kruvidega lauale. Lisaks paigaldati lauale koormus, et posti liikumisel varras ei liiguks koos anduriga (vt joonis 2.11).



**Joonis 2.11** Paigaldatud Lukas LZM 25/200 survesilinder ja horisontaalsuunalist liikumist mõõtev siirdeandur

Koormussilindri töökäik oli maksimaalselt 200mm, kuna post asetses kaugemal pinnasekasti servast, siis paigaldati survekatseseadme ja pinnasekastivahele vajalikud metallplaadid või puitpruss.

Vertikaalvaiumit mõõtev andur paigaldati posti külge sellisele kõrgusele, kus oleks horisontaalliikumine võimalikult lähedane nullile. Andur kinnitati postile kruviga ja varda otsa paigaldati traat, mis omakorda kinnitati talastiku külge. Süsteem töötas nüüd selliselt, et kui vaiale kinnitatud post vajus, siis andur vajus koos postiga ja juhtvarras oli paigal. Vertikaalsiirde mõõtmise süsteem on kujutatud joonisel 2.12.



**Joonis 2.12** Vajumit mõõtev andur

Horisontaalsuunal koormati Lukas LZM 25/200 survekatse seadmega nii nagu joonisel 2.11 oli näidatud. Vertikaalkoormuse rakendamiseks läbi kangülekande seade sai paigaldada koormuse tõstmiseks vajalikud koormusplaadid. Koormamiseks kasutati malmist ahjureste, mida on kujutatud joonisel 2.13. Ühe malmresti lihikaudne mass oli 14,85kg.



**Joonis 2.13** Koormusplaat ja mõõtmed (420×430×25)



## **2.4 Katsemetoodika**

### **2.4.1 Katseplaan**

Katsete läbiviimisel lähtuti peamiselt juhendajate kogemustest ja kirjanduse analüüsimisel kogutud andmetest. Mudelvaia (KV40/6T) juures hinnati dünaamilist ja staatilist kandevõimet ning horisontaal- ja vertikaaljõu koosmõjul kiilvaia käitumist ja kandevõimet. Uuriti vertikaalkoormuse tõstmisel horisontaalkandevõimet. Kõik katsed viidi läbi tihedas pinnases. Kõikidel erinevatel katsetatud variatsioonidel korrati katseid kolm korda, et tulemused oleksid usaldusväärsed, seega tehti kokku 24 katset.

#### **Katsete järjekord :**

1. Dünaamiline katse
2. Staatiline katse
3. Horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõju katse

Katsete andmed on esitatud katseprotokollidel, mis on esitatud lisades (lisa 1)

### **2.4.2 Tegevuskava**

Esimeste kolme staatiliste katsete põhjal saadi teada mudelvaia kandevõime, need tulemused on kogu järgneva tegevuskava aluseks.

#### **2. Pinnase ettevalmistus**

Enne katsete teostamist segati liiv pinnasekastis labida sügavusel, pinnast niisutati veega ja lasti mõni aeg seista. Seejärel kaevati paigaldatava mudelvaia kohas ligi 60cm sügavune auk ja umbes 60×60cm alal. Tagasi täideti auk 10cm kaupa. Tihendati ja täiteti, kuni auk oli ülejäänud osaga tasa. Pinnasekastis siluti liiv latiga.

#### **3. Dünaamilise vaste mõõtmine**

Mudelvaia asukoht määrati mõõdulindi abil, et vai satuks paigaldatava katseseadme kohale. Betoonseinast mõõdetuna kiilvaia keskele on 1600mm. Mudelvai suruti keharaskusega pinnasesse ligikaudu 6-7cm sügavusele. Seejärel keerati juhtvarras kiilvaia keskmisse keermepessa ja asetati vasar juhtvardasse. Vasar asetati alumisse asendisse ja juhtvardale tehti markeriga märke haamri pealispinnast 60cm kõrgemale. Laserlood asetati pinnasekasti äärel sõltumatule horisontaalpinnale, et

lood näitaks horisontaalset kõrgusjoont. Laserjoone kõrgusele tehti rammi juhtvardale algkõrguse määramiseks harilikuga märgis, mille järgi edaspidi vaia pea kõrguse muutumist rammimisel mõõdeti.

Vasar tõsteti juhtvardal 60cm kõrgusele tehtud märgini ja lasti kukkuda. Nii tehti kolm lööki. Seejärel mõõdeti vaia pea kõrguse muut sõltuvalt laserloodiga märgitud algkõrgusest. Vaia pea kõrguse muut tehtud löökidest oli märgise ja laserjoone vaheline pikkus, sest juhtvarras süvistus pinnasesse koos vaiaga. Nii tehti seeriaviisi lööke, kuni vai oli süvistunud 30-3cm.

Kui vai oli liivapinnasest 8-9cm pinnasest väljas, siis edasi hakati vaia süvistama kolmelöögiliste seeriatega. Tehtud löökide arv märgiti vastavuses vaia pea süvistusega katseprotokollis. Kõrguse muut mõõdeti ning märgiti katseprotokollis. Mudelvai jäi lõpuks pinnasest välja 4-5cm. Dünaamilise katsetuse järel väljasurutud pinnas tasandati latiga ja alustati metallposti (120×60×4-L 2500mm) paigaldust.

#### **4. Vertikaalne koormamine**

Paigaldati kangpress ülekandeseade. Üks koormusaste oli 5 minutit, näidud fikseeriti koormusastme alguses, 2 ja 5 minuti möödudes. Koormusastmeid tehti kuni katsevai enam koormust vastu ei võtnud.

Kui katsevai oli surutud läbi staatilise koormuskatse pinnasesse, siis eemaldati kõik paigaldatud koormusplaadid.

Koostati staatilisel katsetusel saadud graafik. Teada on katsevaia kandevõime ja seda saab võrrelda dünaamilisel katsetusel saadud vastetega ning arvutusvalemiga arvutatud kandevõimet omavahel võrrelda.

#### **5. Vertikaal ja horisontaalkoormuse koosmõju**

Järgmisena valmistati ette horisontaal- ja vertikaalkoormuste koosmõju katset. Selleks pandi koormussilinder pinnasekasti, vaiakinga vastu.

Koormamissilindri ja pinnasekasti vahele paigaldati metallplaadid või puitpruss, et koormamissilindri kolvi väljudes silinder ei liiguks. Andur ühendati andmesalvestussüsteemi. Paigaldati horisontaalsuunda mõõtev siirdeandur ja ühendati andmesalvestussüsteemi. Katsevaia juures kohendati pinnast nii, et vai oleks 2cm pinnasest väljas.

Koormusseade vajus koos postiga 4-5cm alla ja selleks tuli koormusseadme talastikku tõsta horisontaalasendisse tagasi. Selleks paigaldati vinkelraua ja IPE 360 tala vahele metallklots, mis hoidis koormusseadet sirgena. Klotsi kaal oli niivõrd

väike, seda arvutuskeemile juurde ei arvutata. Koormarihmadele paigaldati esimene koormusplaat ja koormussilindri kolb survestati vastu vaiakinga.

Katseprotokolli märgiti algnäidud (vertikaal, horisontaal ja surve). Vertikaalkoormus jäi nüüd konstantseks ja hakati kolvile survet avaldama 2 bar kaupa. Iga juurde lisatud bar-i juures hoiti survet 5 minutit, et pinnas paigutuks. Protokolli märgiti; 0 minuti vajum ja siire, 2 minuti vajum ja siire, 5 minuti vajum ja siire.

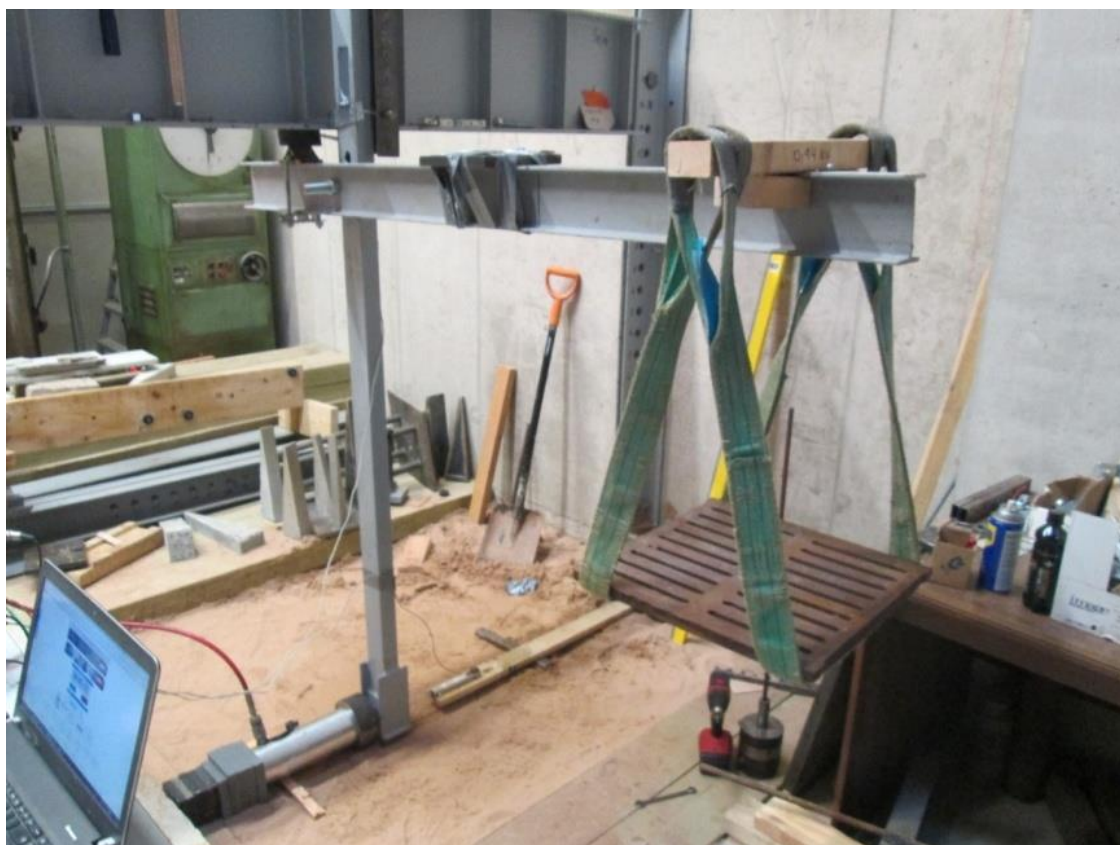
Horisontaalsuunas rakendati jõudu senikaua, kuni pinnas purunes ja enam jõudu vastu ei võtnud.

Kui üheplaadiga horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõju katse sooritati, siis eemaldati koormusplaat koormusseadmelt ja koormusseade ise demonteeriti posti küljest lahti. Pinnasekastist eemaldati siirdeandur ja postilt vajumi andur, samuti survesilinder pinnasekastist. Post võeti ülemisest ja alumisest ühendusest lahti ja eemaldati. Lisaks eemaldati ka katsevai.

Seejärel algas kogu protsess otsast peale: dünaamiline katse, staatiline katse, horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõju katse. Igat katset tehti 3 korda.

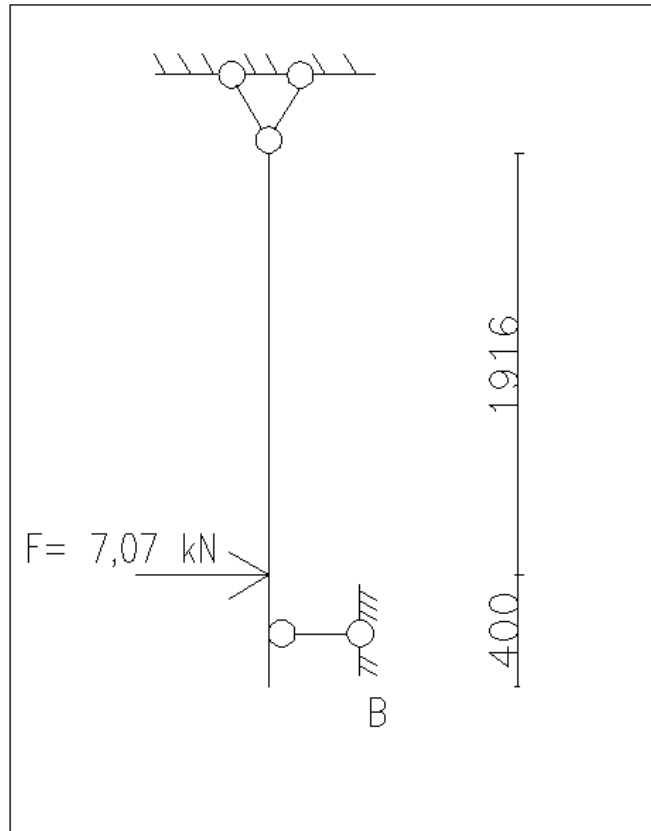
Kui 3 katset horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul oli tehtud, siis järgmisel korral paigaldati kaks koormusplaati. Samuti tehti 3 katset. Katseprotokolli märgiti nüüd teine algkoormus. Parema ülevaate annavad katseprotokollid, mis on esitatud lisas 1.

Viimased horisontaal -ja vertikaalkoormuste koosmõju katsed viidi läbi kaheksa koormusplaadiga, kuna 9 koormusplaadi juures vajus katsevai pinnasesse. Kokku tehti 24 dünaamilist, staatilist, horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõju katset. Horisontaal- ja vertikaaljõu koosmõju rakendamine on esitatud joonisel 2.15.



**Joonis 2.15** Vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju vaiale

Survesilindri näidud baarides teisendati ümber kilonjuutoniteks vastavalt kalibreerimistunnistusele. Selleks, et arvutada tegelik pinnasevastupanu, tehti järgmine arvutusskeem joonisel 2.16



**Joonis 2.16** Horisontaalkandevõime arvutusskeem

Joonisel on kirjeldatud posti pikkus vaiapeast kuni metallpulga toetuseni, mis on 1916mm. Kiilvaia pikkus on 400mm. Selliselt jooniselt arvutati pinnasevastupanu. Kiilvaiale mõjuva pinnase vastupanujõu rakenduspunktiks võetakse alumine kolmandik vaia pikkusest.

*Arvutusnäide:*

$$\sum M_A = 0$$

$$V_B = \frac{7,07 \cdot (1916 - 45)}{(1916 + 400 \cdot \frac{2}{3})} = 6,06 \text{ kN}$$

Saadud jõud on kiilvaia lõplik horisontaalkandevõime ehk  $N_{\text{piir}}$ .

### 3. KATSETULEMUSED JA ANALÜÜS

#### 3.1 Dünaamiline kandevõime

Kiilvaimudeli arvutusliku kandevõimet arvutati Gersevanovi valemiga, mis on täissuuruses kiilvaiade puhul enim kasutatud kandevõimevalemid. Arvutusvalemi kasutamiseks on vaja pinnasesse rammimise käigus mõõdetavat vastet. Vaste saab ühest vasaraga tehtud löögist.

Vaste sõltuvustuuriti staatilistel katsetel saadud proportsionaalsuspiiriga ( $N_{pr}$ ), mis on esitatud tabelis 3.1.

**Tabel 3.1 Vasted ja staatiline kandevõimeproportsionaalsuspiir**

Katsenumber	Vaste (cm)	Npr (kN)
1	0,46	7,34
2	0,4	7,32
3	0,4	7,25
4	0,4	7,68
5	0,4	7,78
6	0,43	7,3
7	0,4	7,45
8	0,43	7,52
9	0,43	7,4
10	0,4	7,54
11	0,4	7,42
12	0,46	7,3
13	0,46	7,2
14	0,46	7,3
15	0,4	7,4
16	0,4	7,4
17	0,4	7,28
18	0,4	7,64
19	0,4	8,4
20	0,4	8,3

Arvutatud on ka Gersevanovi valemiga (valem 1, lk 14) saadud kandevõime hinnangute paikapidavust tegelike kandevõimetega, mis saadi katsetustel.

Kõikide katsetatud variatsioonide kohta ei ole eraldi arvutusi tehtud ja seega on toodud näitena kolme katse tulemused.

Valem annab hinnangulise kandevõime tonnides, et saada tulemus kilonjuutonites, on valemisse lisatud korrutamine raskuskiirendusega  $g$ . Tegur  $\eta$  sõltub vaia materjalist, terasvaia puhul on selle väärtuseks 500 t/m<sup>2</sup>.

### Näide 3.1.

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6T tihedas liivas

$R_{c;m}$  on vaia kandevõime kN;

$A_k$  – vaia ristlõikepindala, cm<sup>2</sup>;

$m_1$  – vasara kaal, t;

$m_2$  – vaia ja kaitsepea kaal, t;

$S_e$  – vaia vajum ühest löögist, cm;

$H$  – vasara langemiskõrgus, cm;

$\eta$  – vaia materjalist sõltuv tegur, t/m<sup>2</sup> (kaitsepeata puitvai:  $\eta = 100$  t/m<sup>2</sup>, kaitsepeaga raudbetoonvai:  $\eta = 150$  t/m<sup>2</sup>, kaitsepeaga terasvai:  $\eta = 500$  t/m<sup>2</sup>).

Valem annab vastuse tonnides, seega tuleb läbi korrutada raskuskiirendusega.

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6T tihedas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{500 \cdot 40,5}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,00757 \cdot 60}{500 \cdot 40,5 \cdot 0,4} \cdot \frac{0,00757 + 0,2 \cdot 0,006968}{0,00757 + 0,006958}} - 1 \right] \cdot 9,81 = 6,87 \text{ kN}$$

Staatilisest katsest mudelile leitud tegelik proportsionaalsuspiir ( $N_{pr}$ ) = 7,3 kN.

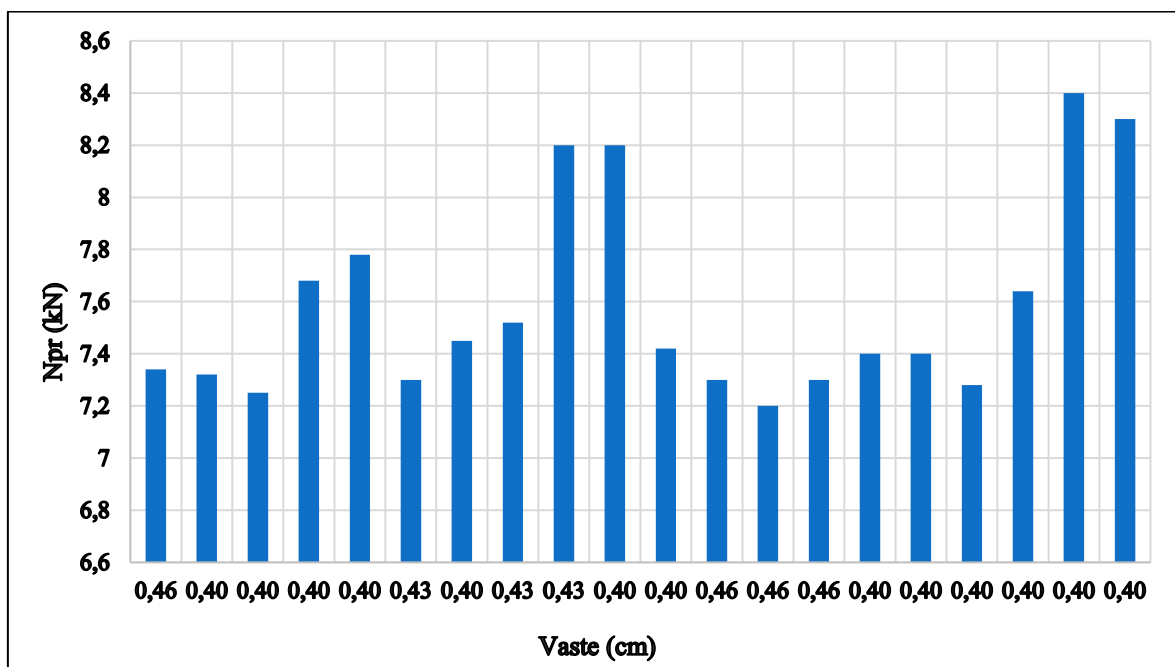
$$R_{c;m} = \frac{500 \cdot 40,5}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,00757 \cdot 60}{500 \cdot 40,5 \cdot 0,43} \cdot \frac{0,00757 + 0,2 \cdot 0,006968}{0,00757 + 0,006958}} - 1 \right] \cdot 9,81 = 6,36 \text{ kN}$$

Staatilisest katsest mudelile leitud tegelik proportsionaalsuspiir ( $N_{pr}$ ) = 7,2 kN

$$R_{c;m} = \frac{500 \cdot 40,5}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,00757 \cdot 60}{500 \cdot 40,5 \cdot 0,46} \cdot \frac{0,00757 + 0,2 \cdot 0,006968}{0,00757 + 0,006958}} - 1 \right] \cdot 9,81 = 5,95 \text{ kN}$$

Staatilisest katsest mudelile leitud tegelik proportsionaalsuspiir ( $N_{pr}$ ) = 7,2 kN.

Tulemustest selgub, et Gersevanovi valem alahindab katsetatud kiilvaimudeli kandevõimet ligikaudu 1kN võrra. See, miks Gersevanovi valem alahindab mudelvaia kandevõimet, võib olla tingitud mitmetest põhjustest, näiteks erinev pinnas, pinnase tihedus, vaia ja rammi kaalu suhe. Neid põhjuseid võib olla veel rohkemgi. Gersevanov ise on öeldud, et piirkoormust ei saa antud valemiga määrata, vaid saab määrata üksnes proportsionaalsuspiiri. Proportsionaalsuspiiri määramine on suhteliselt isikupärane ja täpne tulemus sõltub hindajast. Hinnanguliselt jääb  $N_{pr}$  graafikul üldjuhul teise lõiku, mis asub mittelineaarses tsoonis ja mis on kriitiline. Mudelvaia katsetuste põhjal ja liivpinnaste puhul esineb proportsionaalsuspiir vahemikul 4...7,5 mm vajumi korral. Järgnevalt on esitatud tulpdiaagramm, mis iseloomustab katsetel saadud vasted ja graafikul hinnatud proportsionaalsuspiir. (vt joonis 2.17)



**Joonis 2.17** Proportsionaalsuspiir ja vaste

Tulpdiagrammist näeme, et vastetel 0,40cm võib proportsionaalsuspiir olla minimaalselt 7,2kN ja maksimaalselt 8,4kN. Selline 1–2kN kõikumine sõltub jällegi hindajast ja muudest teguritest, mis on pinnase tihendamisega. Selline visuaalne tulemuste selgitamine on üks võimalus. Teise variandina tehti matemaatiline statistikal põhinev analüüs, hindamaks antud olukorda.

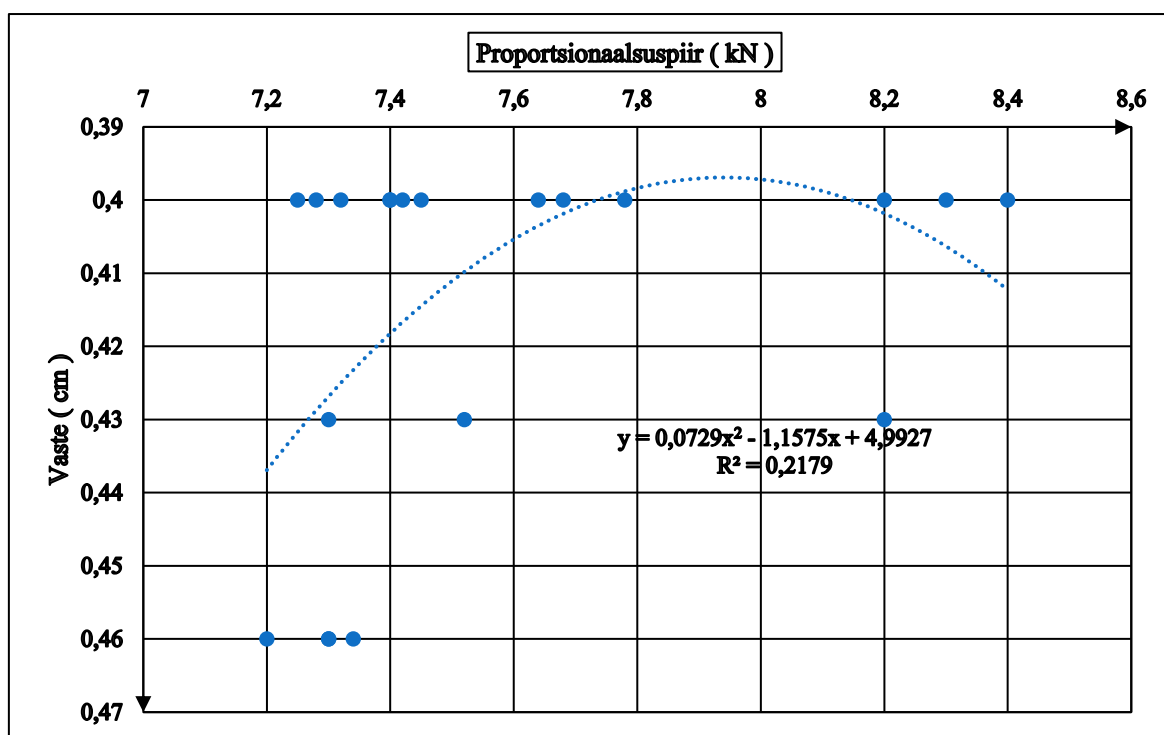


Dünaamilise kandevõime uurimiseks koostati järgnevad protseduurid ja analüüsid.

- Koostati vajalik kahe tunnusega valimi tabel.
- Uuriti kahe tunnuse korrelatsiooni.
- Koostati vastete ja staatilise kandevõime graafik.
- Analüüsiti antud graafikut.
- Koostati regressioonanalüüs.

Kahe pidevat tüüpi tunnusega tabelist on võetud kõikide katsete tulemused, mida iseloomustas tabel 3.1.

Kahe pidevat tüüpi tunnuste võrdlusest antud valimi suhtes analüüsitakse andmete korrelatsiooni. Uuritakse, kui suures korrelatsioonis on vasted ja staatiline proportsionaalsuspiir. Analüüsides selgus, et korrelatsiooni kordaja kahe tunnuse vahel on 0,29 ehk 0,2%. Sellest saame järeldada, et seos kahe antud tunnuse vahel on väga väike. Edasi uuritakse antud töös vaste sõltuvust proportsionaalsuspiiriga, mis on saadud staatilistel katsetel. Andmed on esitatud graafiliselt joonisel 3.18.



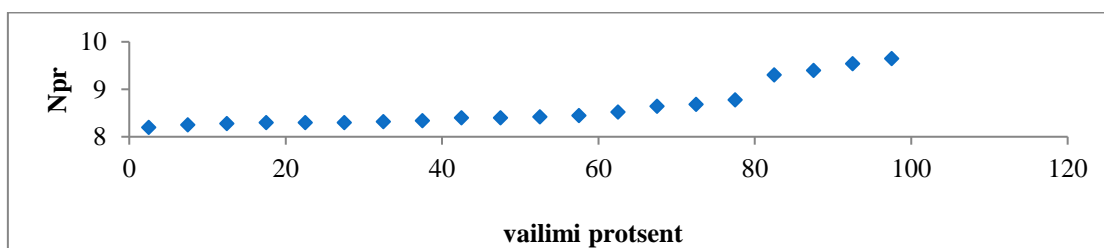
**Joonis 3.18** KV4076T vaste sõltuvus staatilistelt katsetelt saadud katsevaia proportsionaalsuspiiriga.

Katsete tulemustest koostatud graafikul on näha, et vasted on laiali hajuvad trendijoone suhtes. Graafikule on lisatud ka trendijoone valem ja  $R^2$  väärtus, mis näitab samuti trendijoone seotust andmesarjaga, mis on väga väike (0,22).

Mainima peab, et trendijoon ei esita selle andmesarja andmeid. Kuna katseandmeid on 24, siis osad punktid on samas kohas, seepärast on graafikul 18 punkti. Korrelatsioonikordaja järgi võib arvata, et dünaamilistel katsetel saadud vastete ja staatilistel katsetel saadud tegeliku proportsionaalsuspiiri vahel mingit seost ei ole. Uuringu põhjalikumaks analüüsiks tehti regressioonanalüüs, mis on esitatud järgnevas tabelis 3.2.

**Tabel 3.2** Regressioonanalüüs vaste sõltuvusest staatilistelt katsetelt saadud katsevaia proportsionaalsuspiiriga.

Regressioonanalüüs				
$R^2$	0,083985287	kirjelduse tase 0,8 %		
Kohandatud $R^2$	0,03309558			
Standardhälve	0,456091616	mudeli viga		
Vaatlus	20	analüüsitud valim		
	koefitsient	standardhälve	$t$ -statistik	$p$ -väärtus
Lõikepunkt	10,88396396	1,762540894	6,175155	7,88856E-06
Cm	-5,42728443	4,224700735	-1,28466	0,215199931



**Joonis 3.19** Regressioonanalüüsi normaaljaotus

Normaaljaotuse diagramm on sujuv, mudel on hea ning  $p$ -väärtused väga väikesed. Kirjutame välja mudeli ehk valemi.

$$MUDEL; N_{pr} = -5,42 \cdot S_e + 10,88 \pm 0,45, \quad (5)$$

kus  $N_{pr}$  -proportsionaalsuspiir kN;

$S_e$  - Vaste cm.

Tabelist on näha, et analüüsis oli andmeid 20 ja et  $R^2$  väärtus on 0,08 ehk kirjelduse tase on 0,8%. Regressioonianalüüsi puhul vaatleme üht tunnust kui sõltuvat 1 ning püüame leida tunnuseid, mille põhjal oleks võimalik kirjeldada ning ühtlasi ka prognoosida selle sõltuva tunnuse väärtusi. Kirjeldav mudel ning prognoos on seda täpsem, mida tugevamini sõltumatu tunnus sõltuva tunnusega seotud on.

Saadud mudeli valemi põhjal võime arvutada järgmise näite:

*Näide 3.2:*

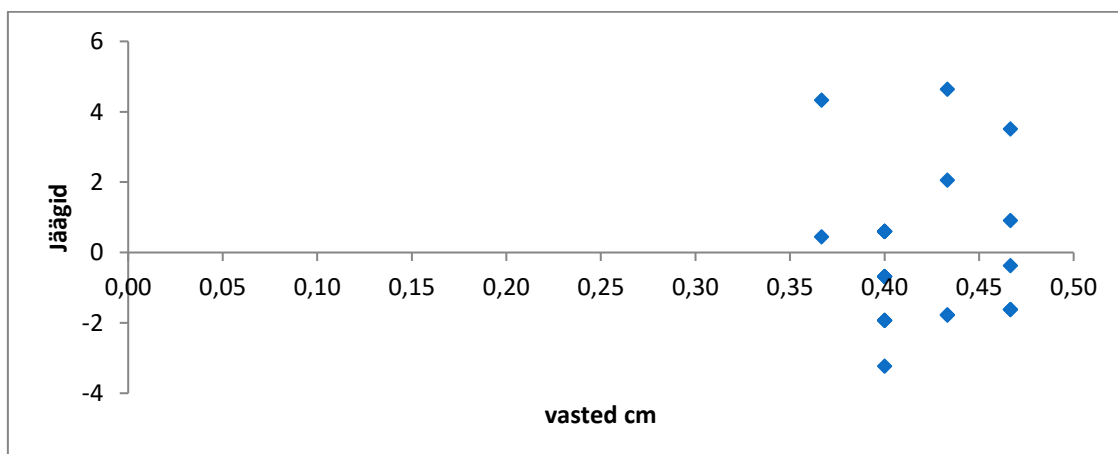
Kui dünaamilisel katsel saame vaste 0,40cm, siis lisame vaste valemisse ja saame:

$$N_{pr} = -5,42 \cdot 0,40 + 10,88 \pm 0,45$$

$$N_{pr} = 8,17 \pm 0,45$$

Dünaamilistel katsetel, mille vasted võrdusid 0,40cm, saadi keskmine staatiline proportsionaalsuspiir 7,80kN. Antud valem kehtib ainult katsetatud mudelile ja pinnasekastis olevale pinnasele.

Kuigi korrelatsioonikordaja on väga väike ning seos kahe tunnuse vahel on nõrk, annavad siiski kaks diagrammi alust arvata, et mudelit saab usaldada, sest normaaljaotuse diagramm on sujuv ning vastete jäägid on võrdsed ehk negatiivsed ja positiivsete jääkide summa on võrdne.

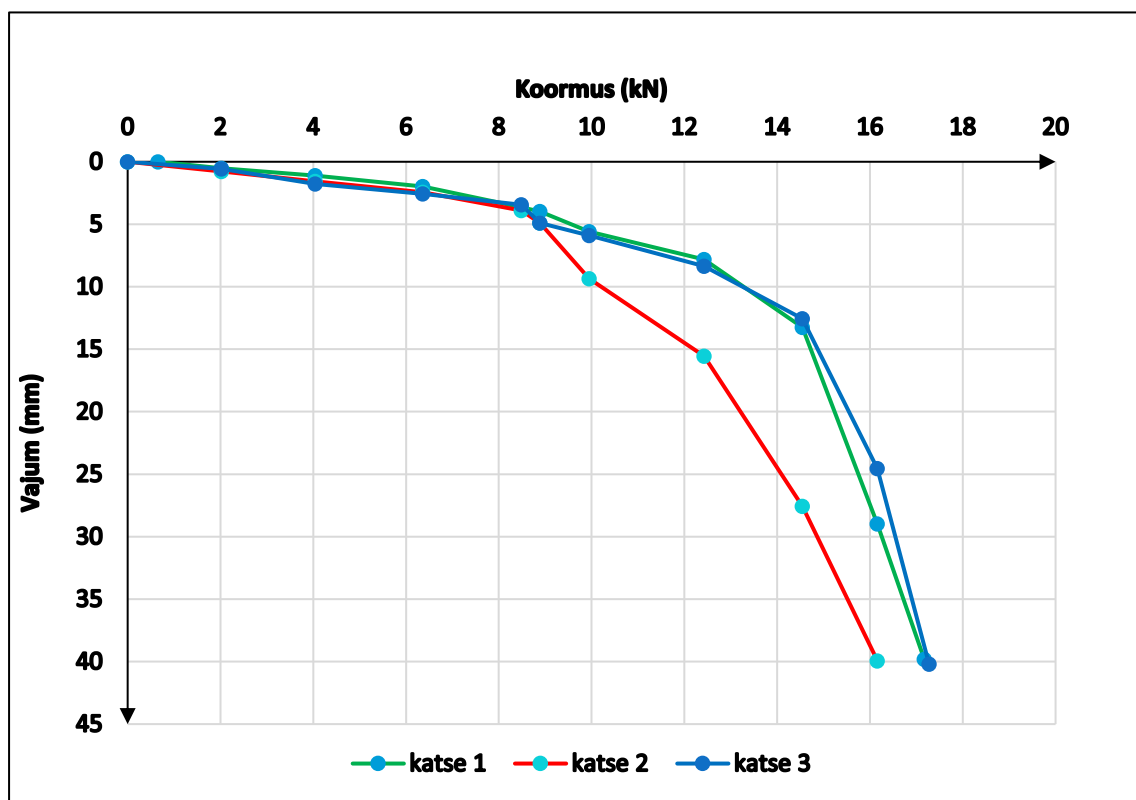


**Joonis 3.20** Vastete jääkide diagramm

### 3.2 Staatileine kandevõime mudelil

Tegevuskavas mainiti, et kõige alguses tehti (joonise 2.3, peatükiks 2.3.1) alusel staatilised katsetused. Staatilese kandevõime katseid tehti esialgu 3, et teada saada katsevaia kandevõime. Kui alguses tehtuid katseid mitte arvestada, siis kokku tehti 24 staatilise koormuse katset. Kõikidele katsetulemustele tehti graafikud, mis on esitatud lisas 1. Kõikidelt graafikutelt joonistusid välja kolm ootuspäraselt eristuvat piirkonda, mida kirjeldab joonis 3.21.

- Esimeses piirkonnas kasvas koormuse lisades vajum lineaarselt.
- Teises piirkonnas toimus koormuse lisades järjest suurenev vajumine, mis moodustas graafikul kõvera. Teine piirkond on vaia kandevõime seisukohalt kriitilise olukorraga. Koormuse juurdekasvukorral võib stabiilsus kaduda.
- Kolmandas piirkonnas toimus lineaarne vajumine. Koormuse lisades kasvas vajum suurelt, mis näitas, et vai on kandevõime kaotanud. Kolme katse staatilise koormuskatse graafik mudeliga KV40/6T tihedas pinnases tehtud katsetest on toodud välja joonisel 3.21



Joonis 3.21 KV40/6T staatiliste koormuskatsete graafikud tihedas pinnases

Graafikult näeme, et kolmest katsest teine katse vajub järsemini kui esimene ning kolmas katse, kuigi esimeses piirkonnas kasvas koormuse lisades vajum kõigil kolmel katsel lineaarselt võrdselt. Teises piirkonnas esineb erinevusi katsetel. Iseloomulikud punktid graafikult ehk piirkoormused on leitud nende katsete tulemuste graafiku järgi. Esimese piirkonna lineaarse lõigu lõpus iseloomustab vaia külgede vastupanu piirkoormus (edaspidi  $N_k$ ).

Teisel lõigul, mis asub mittelineaarses tsoonis ja mis on kriitiline, iseloomustab proportsionaalsuspiir (edaspidi  $N_{pr}$ ), kus vajum ületab 4mm. Graafikult saab piirkoormuste kohta välja lugeda järgmised tulemused:  $N_k = 6,5\text{kN}$ ,  $N_{pr} = 8,7\text{kN}$  ja  $N_{piir} = 16-17\text{kN}$ . Kõige raskem on piirkoormustest määrata proportsionaalsuspiiri ja tihti on selle hindamine isikupärane. Üldjuhul jääb see teise lõiku, mis asub mittelineaarses tsoonis. Mudelvaia katsetuste põhjal ja liivpinnaste puhul esineb proportsionaalsuspiir vahemikul 4...7,5mm vajumi korral.

Graafikult näeme, et kolmandas lõigus toimub järsk langus. Kui 8,8kN suuruse koormuse juures on vaid 5mm suurune vajum, siis lõpus on aga 8kN lisamine toonud kaasa lausa 30mm suuruse vajumi. Lisaks loeme graafikult välja mittelineaarse kriitilise tsooni, mis avaldub järgnevas vahemikus; algus  $P = 8,8\text{kN}$  ja lõpeb  $P = 14,54\text{kN}$  juures. Edasi toimub lineaarne liikumine. Antud vahemikus vajub vai ligikaudu 12mm ulatuses pinnasesse ja järgnevatel koormusastmetel tekivad pinnases suured deformatsioonid. Nagu mainitud, siis need katsed viidi läbi hüdrosilindri abil. Järgnevad 24 staatilist katset viiakse läbi kangpress ülekande seadmega.

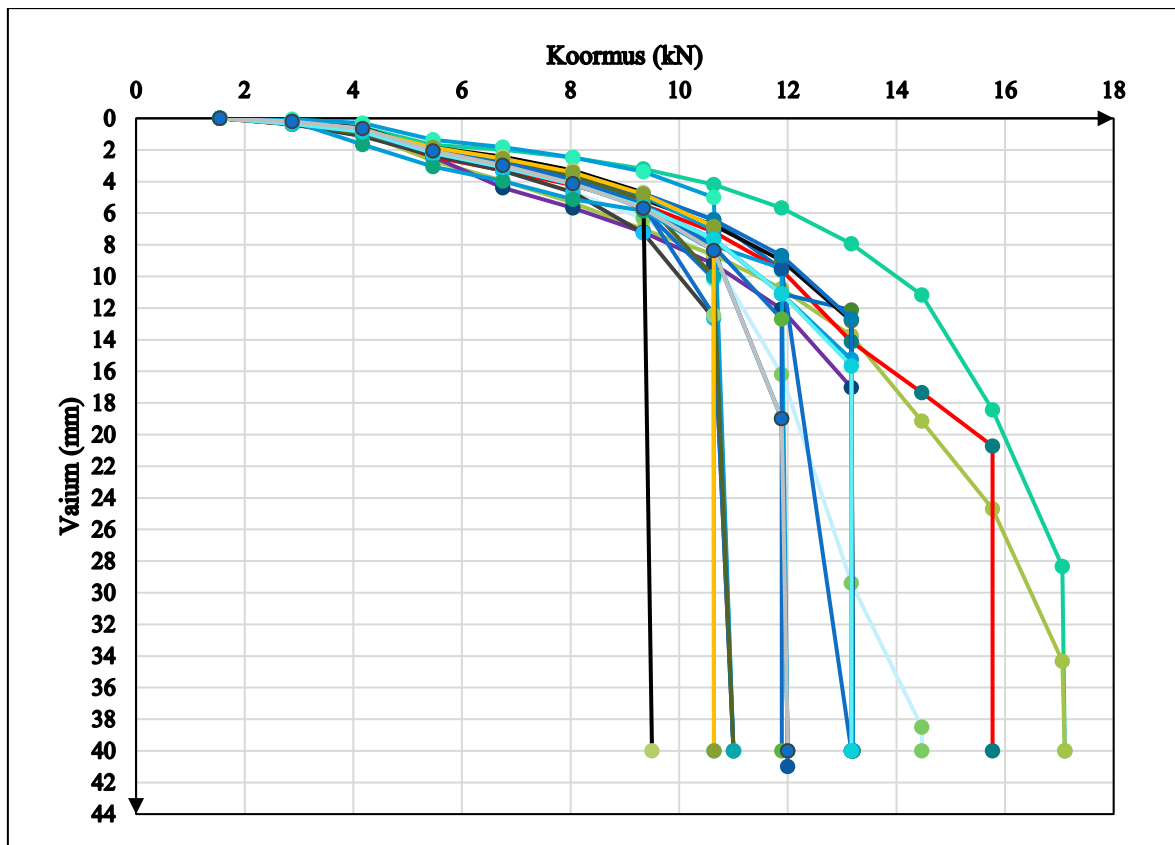
### 3.3 Staatilised koormuskatsed kangpress ülekande seadmega

Katsetuste erinevus on selles, et hüdrosilindriga jõudu rakendades on vaiapea pinnasest väljas ligikaudu 1,5cm, aga kangpressiga jõudu rakendades on vai 4-5cm pinnasest väljas. Vai asetseb kõrgemal postikinga paksuse tõttu. Kuna postiking on vaiast suurem, siis ei katsetataks enam vaia kandevõimet, vaid posti omavõimet. Staatilised koormuskatsed kangpress ülekandega on esitatud joonisel 3.22.



**Joonis 3.22** Staatilised katsed koormuskatseseadmega

Nagu jooniselt on näha, on lisatud juurde järjest koormusplaate teatud aja tagant. Koormust suurendati senikaua, kuni katsevai enam koormust vastu ei võtnud ja vajus pinnasesse. Iga lisatud koormuse ajal toimus vajumine ja antud vajumist iseloomustab järgmine graafik. (vt joonis 3.23)



**Joonis 3.23** KV40/6T Staatiliste koormuskatsete graafikud tihedas pinnases

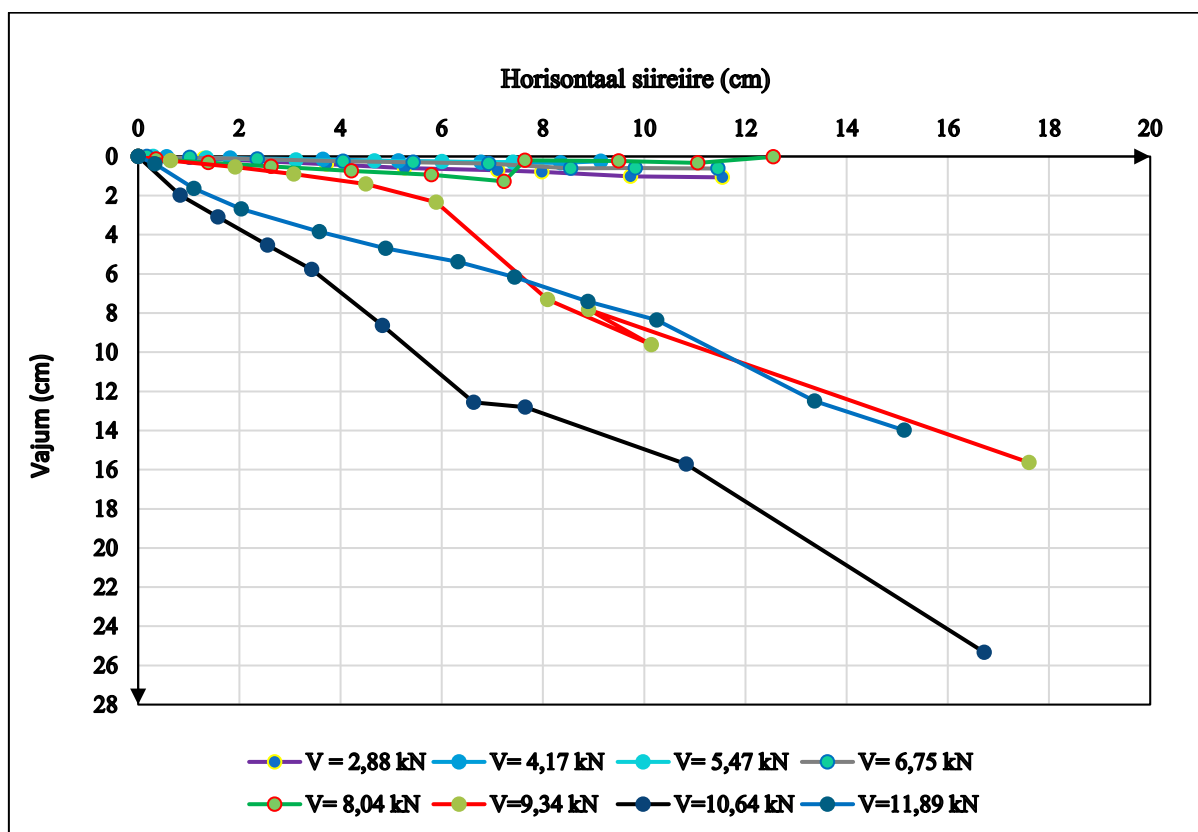
Graafikult näeme kõiki 24 katse tulemusi. Graafikult tuuakse välja minimaalsed ja maksimaalsed tulemused. Esimeses piirkonnas kasvas koormuse lisades vajum kõigil katsel lineaarselt võrdselt, see iseloomustab vaia külgede vastupanu ehk  $N_k$  vahemikul 4-5 kN.

Teisel lõigul, mis asub mittelineaarses tsoonis, on iseloomulik proportsionaalsuspiir, kus vajum ületab 5mm. Selliselt koondatud graafikult on proportsionaalsuspiiri kohta välja lugeda raske ning siiski vaadeldakse  $N_{pr}$  üksikul graafikutel. Üldjuhul võib öelda, et mudelvaia katsetuste põhjal ja liivpinnaste puhul jääb proportsionaalsuspiir vajumi korral vahemikku 4...7,5mm.

Kolmandas lõigus näeme, et kõikide katsete puhul toimub järsk langus. Minimaalne  $N_{piir}$  on 9.5kN ja maksimaalne 17kN .

### 3.3 Vertikaal-ja horisontaalkoormuse koosmõju mudelil

Pärast staatilist katset koormati kiilvaia vertikaalselt ja horisontaalselt. Maksimaalselt koormati vertikaalselt katsevaia piirkoormuseni, mis oli 9 koormusplaati ehk 13,7kN. Kuna 100% -lise koormuse juures vajuks vai pinnasesse, siis viimaseks astmeks jäi 8 koormusplaati ehk 11,89kN. Kokku sai katseandmeid 24, kuna kõikide koormusplaatideastmetega tehti kolm katset. Kõikidele katsetulemustele tehti graafikud, mis on esitatud eraldi dokumendina. Katsetulemustest saab koostada erinevaid graafikuid. Antud töös on koostatud ja vaadeldud kahte põhilist näitajat. Esmalt uuritakse kiilvaia paigutusi vertikaalselt erinevatel koormusastmetel, mis on esitatud joonistel 3.24.



**Joonis 3.24** Horisontaal-ja vertikaalkoormuse graafik

Graafikul näeme kiilvaia liikumist vertikaal- ja horisontaalsuunal. Legendis tähistatud „V“ on vertikaalkoormus aste antud katsel. Kuna ühel vertikaalkoormus astmel tehti 3 katset, siis toome 8 katse keskmised graafikule. Graafikult joonistub välja kaks täiesti erinevat piirkonda. Vertikaalkoormuse juures 2,88–6,75kN ei ületa vajum 1,5cm, kuid alates 8,04 vertikaalkoormuse juurest muutub vajum märgatavalt. Vertikaalkoormusel 9,34 -11,89kN on ka horisontaalsiirded suuremad. Horisontaalsiirdel 7mm juures paigutub kiilvai vähem



vertikaalsuunas, mis on tingitud sellest, et pinnas on niivõrd kokku pressitud külgtahule ja samas algab pinnase purunemine ehk toimuvad elastsed deformatsioonid, mis on esitatud ka joonisel 3.25.



**Joonis 3.25** Pinnase deformatsioonid horisontaalsel ja vertikaalsel koormamisel

Katseandmete ja graafikute põhjal võib öelda, et 1-4 koormusplaadi korral ei ületa vajum 1,3mm vertikaalset paigutust. Horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul rakendati vertikaalkoormuse astmeid 2,88, 4,17, 5,47, 6,75kN. Need võrduvad 1-4 koormusplaatide arvuga ja kuuluvad gruppi 1. Nende astmete korral purunes pinnas vaiapea nurkadest enam vähem 45 kraadiste joontena (vt joonis 3.25). Kuid koormuste lisamisel suruti pinnast hoopis suurema nurga all ja andmed kuuluvad grupi 2. Kõikide 24 katsete keskmised tulemused horisontaal-ja vertikaalkoormuse korral on esitatud tabelis 3.3.

**Tabel 3.3.** Kolme katse keskmised tulemused horisontaal-ja vertikaalkoormuse korral

	<b>Koormusplaatide arv</b>	<b>Vertikaalkoormus (kN)</b>	<b>Horisontaalkoormus (kN)</b>
<b>Grupp 1</b>	1	2,88	6,81
	2	4,17	6,53
	3	5,47	6,24
	4	6,75	7,94

<b>Grupp 2</b>	5	8,04	8,23
	6	9,34	9,37
	7	10,64	7,66
	8	11,89	10,22

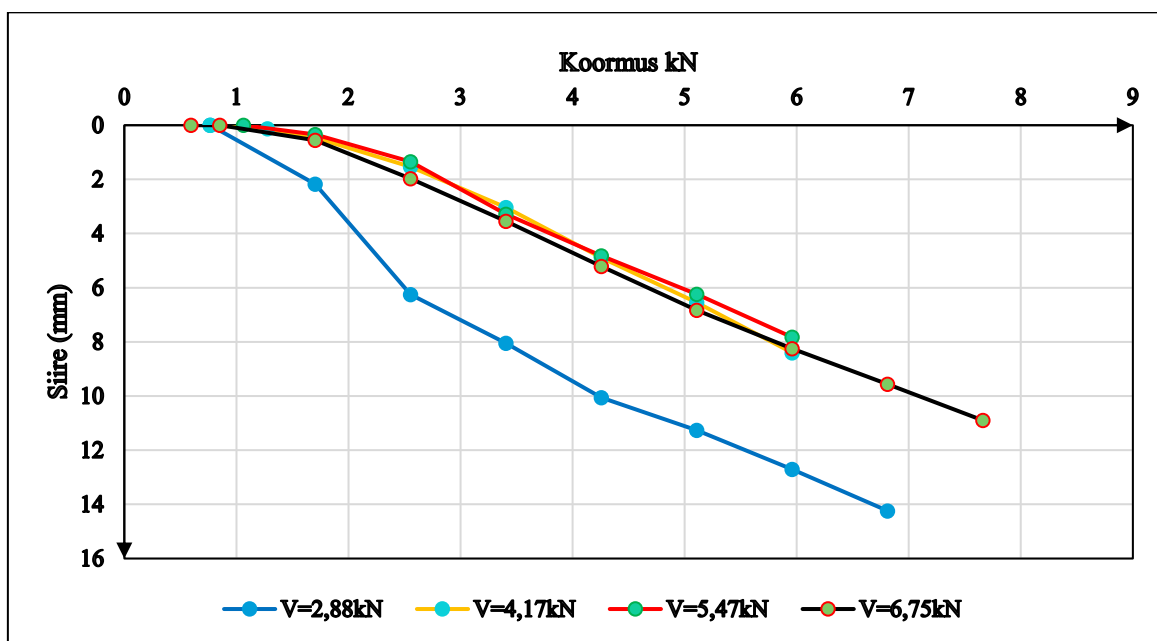
Tulemused on jaotatud kahte gruppi. Grupis 1 toimus lineaarne käitumine, kuid grupis 2 toimus mittelineaarne deformatsioon. Peatükiks 3.4 joonisel 3.27 on antud olukord graafiliselt esitatud.

Tabelist näeme, et pinnas purunes 6,81kN juures kui vertikaalne koormus oli 2,88kN. Sarnaselt võime iseloomustada kõiki punkte. Purunemispilti iseloomustab tabelis grupp 1 märgitud numbrid (joonisel 3.25), vajukid ei ületa 1,3mm. Tabelis märgitud grupp 2 numbrite korral muutub kiilvaia käitumine pinnases oluliselt. Vertikaalkoormuse suurendamisel vajub vai oluliselt sügavamale ja pinnase vastupanu suureneb. Suuremate vertikaalkoormuste korral, alates 8,04kN, purunes pinnas suurema nurga all ehk pinnast haarati rohkem kaasa horisontaalkoormamisel. Pinnas purunes vaiapea nurkadest 90 kraadiste joontena (vt joonis 3.26).



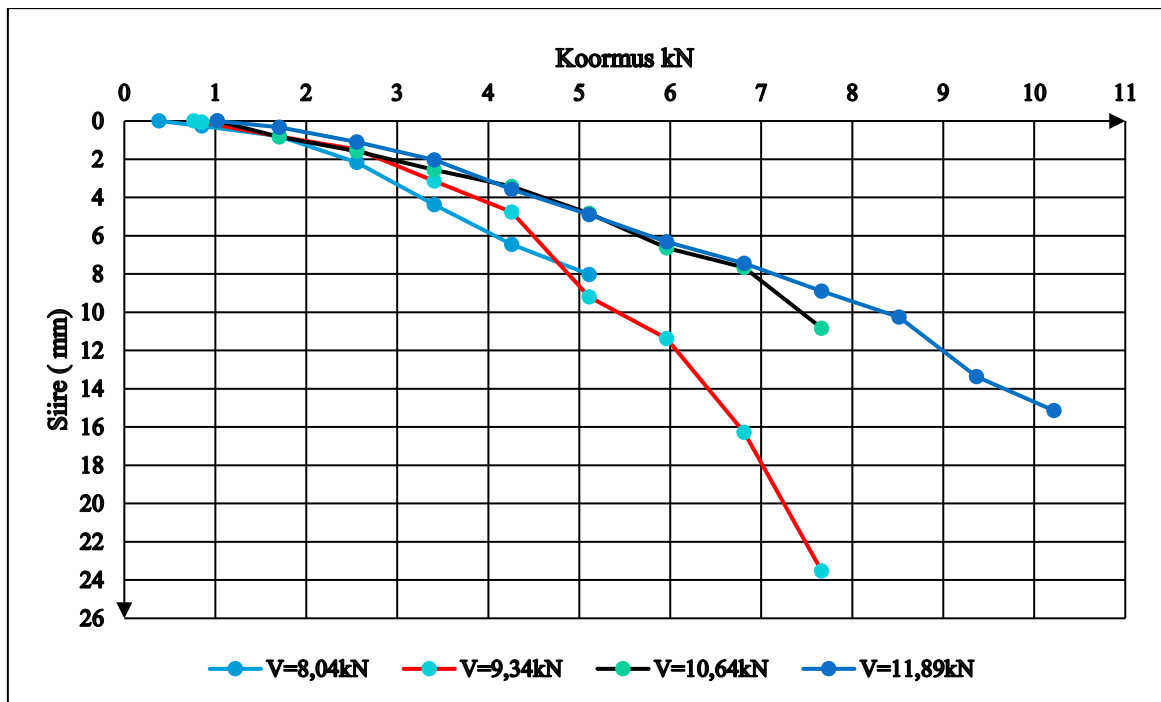
**Joonis 3.26** Pinnase deformatsioonid horisontaalsel ja vertikaalsel koormamisel

Teiseks uuritakse kiilvaia paigutusi horisontaalselt erinevatel koormusastmetel, millest on koostatud horisontaalkoormuse graafikud joonisel 3.27. Kõikidest katsetest on esitatud horisontaalkoormusgraafikud ning horisontaal- ja vertikaalkoormusegraafikud, mis on esitatud eraldi lisa 1-s. Antud peatükis vaadatakse katseid koos.



**Joonis 3.27** Horisontaalkoormuse graafik („V“ tähistab vertikaalkoormust)

Horisontaalkoormuse graafikud jagati kaheks eraldi graafikuks (vt joonis 3.27 ja 3.28), et paremini iseloomustada kahte erinevat piirkonda, millest oli eelnevalt juttu. Antud graafik iseloomustab siis kiilvaia koormatuna konstantselt vastavalt rakendatud vertikaaljõule. Horisontaalselt rakendati jõudu 1kN kaupa, kuni pinnase purunemiseni (graafikule märgituna „koormus kN“). Vastavalt rakendatud horisontaalkoormusele muutus siirdeanduri lugem. Horisontaalkoormusgraafikule kehtivad samad seosed, mis vertikaalsete paigutiste korral. Joonisel 3.27 kehtib samasugune purunemispilt, mis tekkis joonisel 3.25. Vertikaalkoormuse suurendamisel 8-st kuni 12kN toimuvad muudused graafikus, mida iseloomustab joonis 3.28.



**Joonis 3.28** Horisontaalkoormuse graafik („V“ tähistab vertikaalkoormust)

Graafikult võib välja lugeda, et vertikaalkoormuse 8,04, 10,64, 11,89kN korral ehk 5, 7, 8 koormusplaadi korral toimub mittelineaarne siire. Sarnaselt vertikaalsele paigutusele iseloomustab ka antud horisontaalkoormusgraafik puruemisjoonist 3.26. Vaadeldes ainult 9.34kN vertikaalkoormuse korral horisontaalset siiret, näeme, et paigutised moodustavad kõvera. Ühtlasi moodustab 9.34kN staatilisest kandevõimest 68%. Katsetetulemusena sooviti teada saada just seda, kas midagi sarnast toimub, nagu antud vertikaalkoormusel tekib. Uurime järgmises peatükis lähemalt kahte hüpoteesi, mis on esitatud töö alguses:

- Kiilvaia vertikaalkoormuse ja horisontaalkandevõime vaheline seos on lineaarne.
- Kiilvaia vertikaalkoormuse ja horisontaalkandevõime vaheline seos on mittelineaarne.

### 3.4 Horisontaal- ja vertikaalkandevõime kiilvaial

Horisontaal- ja vertikaalkandevõime uurimiseks koostati järgnevad protseduurid ja analüüsid.

- Koostati vajalik kahe tunnusega valimi tabel.
- Uuriti kahe tunnuse korrelatsiooni.
- Koostati horisontaal- ja vertikaalkandevõime graafik.
- Analüüsiti antud graafikut.
- Koostati regressioonanalüüs.

Kahe pidevat tüüpi tunnusega tabelisse on võetud kõikide katsete tulemused, mida iseloomustab tabel 3.4.

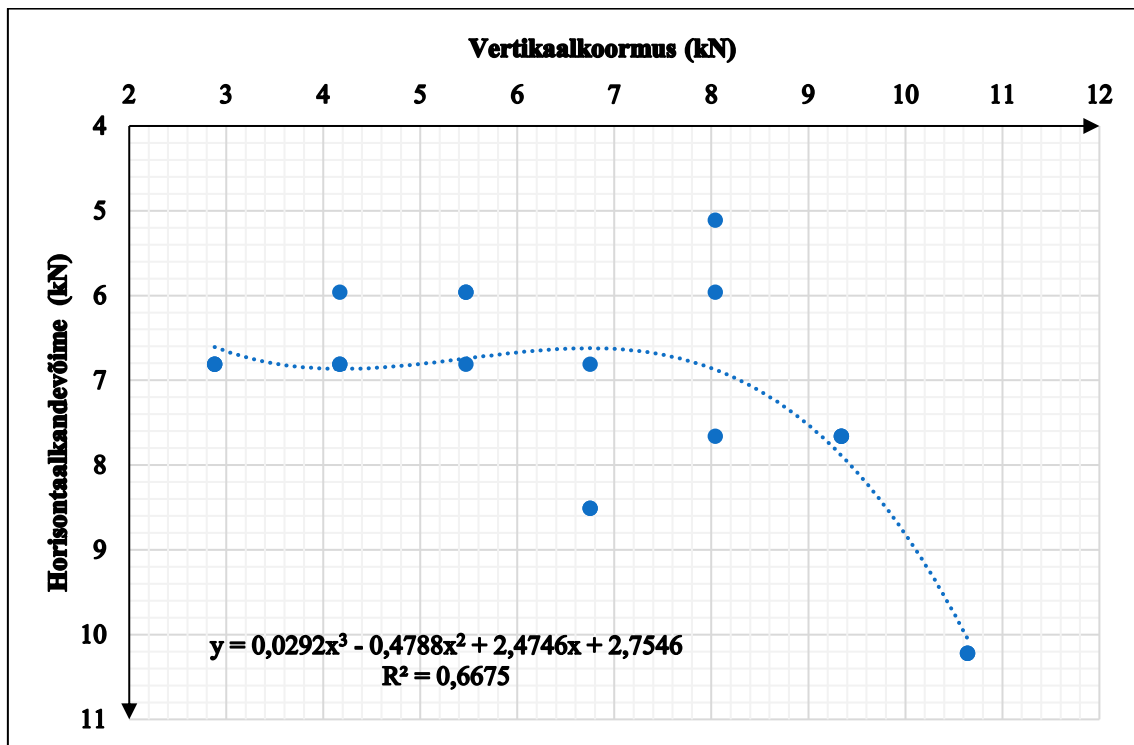
**Tabel 3.4.** Vertikaalkoormuse muutmisel tekkinud horisontaalkandevõime

Katse number	Vertikaal koormus (kN)	Horisontaalkandevõime (kN)
1	2,88	6,81
2	2,88	6,81
3	2,88	6,81
4	4,17	6,81
5	4,17	6,81
6	4,17	5,96
7	5,47	5,96
8	5,47	5,96
9	5,47	6,81
10	6,75	8,51
11	6,75	8,51
12	6,75	6,81
13	8,04	10,22
14	8,04	9,37
15	8,04	5,11
16	9,34	14,48
17	9,34	7,66
18	9,34	5,96
19	10,64	7,66
20	10,64	7,66
21	10,64	7,66
22	11,89	10,22
23	11,89	10,22
24	11,89	10,22

Tabelist 3.4 näeme, et iga vertikaalkoormuse astme juures korratakse katset kolm korda, et antud tulemused oleksid usaldusväärsed. Tabelis punasega märgitud andmed tähistavad juhtumit, kus pinnas oli märg ja need andmed tuleks analüüsist välja jätta.

Kahe pidevat tüüpi tunnuste võrdlusest antud valimi suhtes analüüsitakse andmete korrelatsiooni. Uuritakse, kui suures korrelatsioonis on vertikaalkoormus ja horisontaalkandevõime. Analüüsist selgus, et korrelatsioonikordaja kahe tunnuse vahel on 0,53 ehk 53%. Sellise tulemuse saame, kui võrrelda kõiki andmeid. Jättes välja punasega märgitud andmed, on korrelatsioonikordaja 0,63 ehk 63%. Sellest järeldub, et seos kahe antud tunnuse vahel on üsna suur.

Edaspidistest analüüsist jätame välja punasega märgitud andmed, mis olid tabelis 3.4. Järgmisena koostati seose paremaks vaatlemiseks graafik, mida iseloomustab joonis 3.29.



**Joonis 3.29** Horisontaal -ja vertikaalkandevõime vaheline seos

Andmetest moodustunud graafikul on näha, et punkte on vähem kui andmeid. See on tingitud sellest, et osad punktid on samas kohas. Graafikule on lisatud trendijoon, mis on alati seotud andmesarjaga, kuid see ei esita selle andmesarja andmeid. Trendijoon kasutatakse hoopis olemasolevate andmete trendide esitamiseks või tulevaste andmete prognoosimiseks.

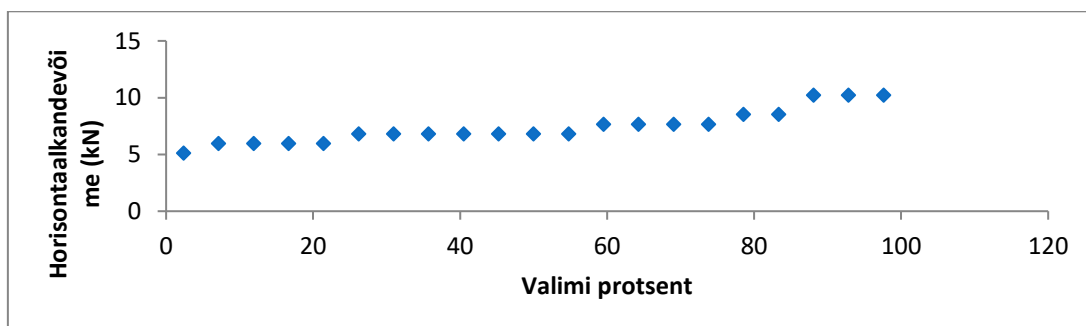
Korrelatsioonikordajaks saadi 0,63. Graafikule lisati võimalikult ligilähedane trendijoon, mis oleks korrelatsioonikordajale võimalikult lähedal. Trendijoonena valiti kolmanda astme polünoom, sest muutujaid on üks ja selleks muutujaks on vertikaalkoormus. Trendijoonele iseloomulik valem ja  $R^2$  väärtus on samuti lisatud graafikule. Antud trendioon kirjeldab andmesarja 67%, täpsusega. Lisaks graafiku koostamisele uuritakse ka statistiliste analüüsidega andmete sõltuvust. Selleks analüüsiks kasutati statistiliselt regressioonanalüüsi.

Regressioonanalüüsi puhul vaatleme üht tunnust, kui sõltuvat 1 ning püüame leida tunnuseid, mille põhjal oleks võimalik kirjeldada ning ühtlasi ka prognoosida selle sõltuva tunnuse väärtusi. Kirjeldav mudel ning prognoos on seda täpsem, mida tugevamini sõltumatu tunnus sõltuva tunnusega seotud on.

Järgmisena on esitatud väljavõte regressioonanalüüsist.

**Tabel 3.4.** Regressioonanalüüs vertikaalkoormuse sõltuvus horisontaalkandevõimele

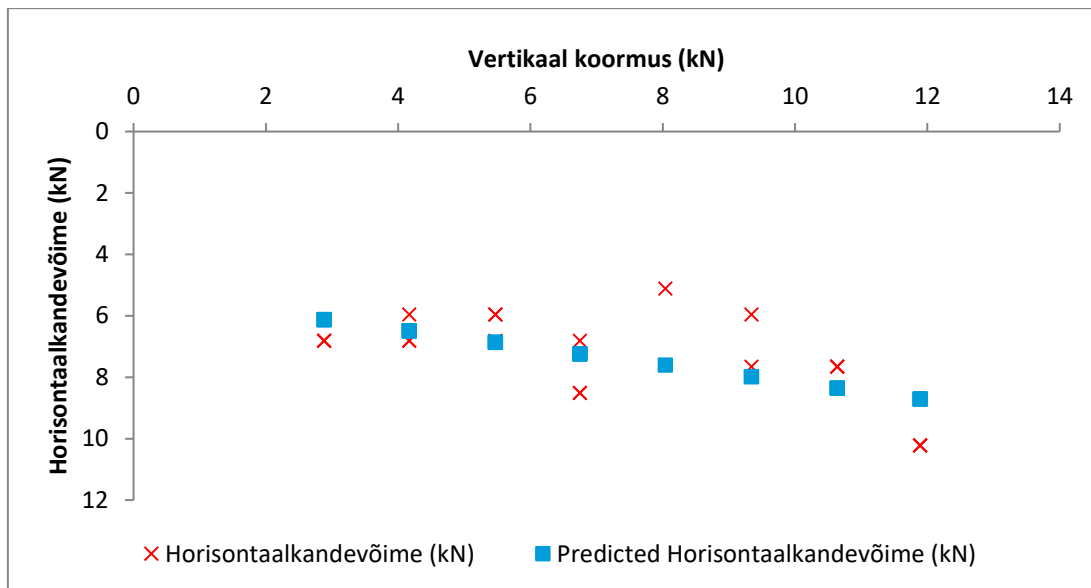
Regressioonanalüüs				
$R^2$	0,397229756	kirjelduse tase 40 %		
Kohandatud $R^2$	0,365505006			
Standardhälve	1,161941374	mudeli viga		
Vaatlus	21	analüüsitud valim		
	koefitsient	standardhälve	t-statistik	p-väärtus
Lõikepunkt	5,295038823	0,640964066	8,261054	1,03685E-07
cm	0,287563665	0,081266625	3,538521	0,00219474



**Joonis 3.30** Regressioonanalüüsi normaaljaotus

Normaaljaotuse diagramm on sujuv ning mudel on väga heaja p väärtused väga väikesed.





**Joonis 3.31** Tegelik ja oodatud horisontaalkandevõime

Regressioonanalüüsi diagramm annab tegeliku ja oodatud horisontaalkandevõime vahe, kus X on tähistatu tegelik sõltuvus ja ruudukujuline on oodatud. Nii regressioonanalüüs kui ka joonis 3.27 annavad sama tulemuse. Näeme analüüsist, et oodatud kandevõime on lineaarne, kuid tegelikult on tulemus teistsugune. Tegemist on kahe olukorraga, mida on mainitud juba eelnevalt. Vertikaalkoormuseni 6kN on lineaarne deformatsioon, kuid edasi on mittelineaarne. Nende analüüsides ja protseduuride põhjal võib öelda, et korrelatsioon on kahe tunnuse vahel täiesti olemas ja graafikust selgus, et koormates kiilvaia vertikaalselt ja horisontaalselt, jääb kandevõime graafik kolmanda astme polünoomiks.

Järgneva arvutusmodeli põhjal on võimalik arvutada horisontaalkandevõime.

$$MUDEL: R_{c,h} = 0,28 \cdot V + 5,28 \pm 1,16, \quad (6)$$

kus  $R_{c,h}$  – horisontaalkandevõime kN;

V – vertikaalkoormus kN.

Arvutame näite antud valemi põhjal.

Näide 3.4:

$$R_{c,h} = 0,28 \cdot 2,88 + 5,28 \pm 1,16 = 6,08 \pm 1,16 \text{ kN}$$

Vertikaalkoormusel 2,88kN katsetatud kiilvaia võrdus horisontaalkandevõimega 6,81kN.



### 3.5 Horisontaalkandevõime ja staatilise kandevõime võrdlus

Staatilistel katsetel saadi piirkoormus, mis võrdus kiilvaia kandevõimega. Vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju katsetel saadi horisontaalkandevõime erinevatel vertikaalkoormustel. Arutluse käigus analüüsiti, kas on mingit seost kahel erineval katsel. Koostati sarnaselt eelnevas peatükis esinenud protseduurid ja analüüsid.

- Koostati vajalik kahe tunnusega valimi tabel.
- Uuriti kahe tunnuse korrelatsiooni.
- Koostati horisontaalkandevõime ja staatilise kandevõime graafik.
- Analüüsiti antud graafikut.
- Koostati regressioonanalüüs.

Tabelis 3.5 esinevad tunnused on samuti pidevat tüüpi ja iseloomustavad staatilistel katsetel saadud piirkoormusi ja vertikaalkoormuse muutumisel horisontaalkandevõimet.

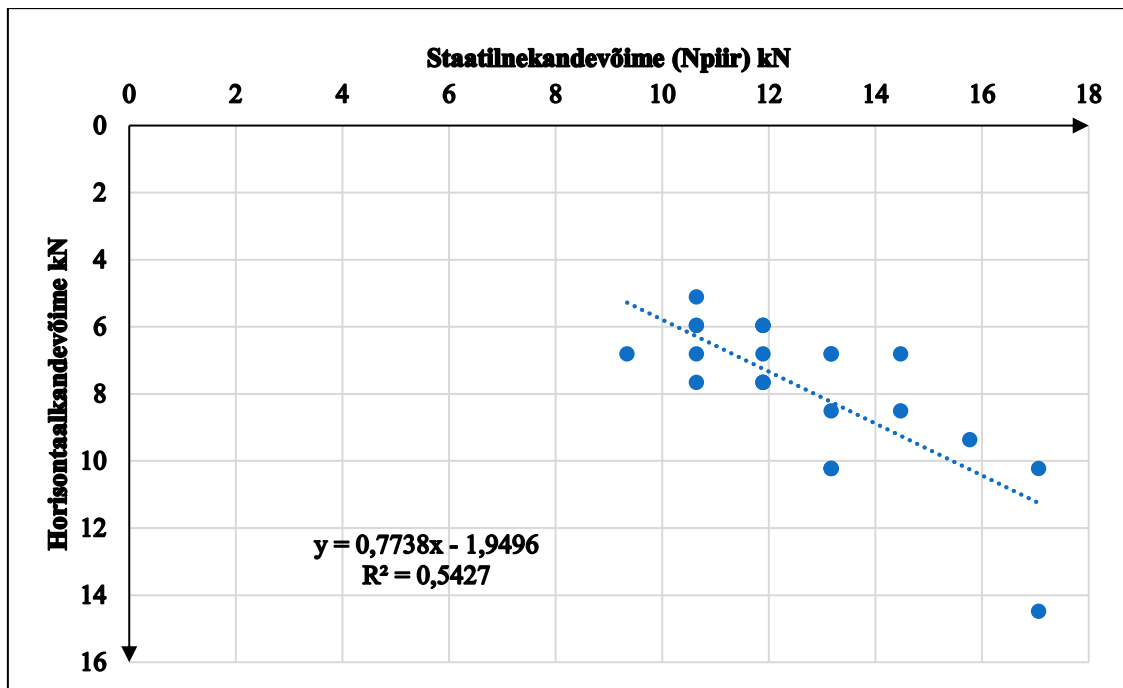
**Tabel 3.5.** Staatiline kandevõime ja horisontaalkandevõime

nr	Staatiline kandevõime kN	Horisontaalkandevõime kN
1	13,17	6,81
2	13,17	6,81
3	14,47	6,81
4	11,89	5,96
5	11,89	5,96
6	9,34	6,81
7	10,64	5,96
8	10,64	5,96
9	10,64	6,81
10	14,47	8,51
11	13,17	8,51
12	11,89	6,81
13	17,06	10,22
14	15,77	9,37
15	10,64	5,11
16	17,06	14,48
17	10,64	7,66
18	11,89	5,96
19	11,89	7,66
20	11,89	7,66
21	11,89	7,66
22	13,17	10,22
23	13,17	10,22
24	13,17	10,22

Antud valimi suhtes uuritakse, kui suures korrelatsioonis on staatiline kandevõime ja horisontaalkandevõime. Analüüsides selgus, et korrelatsioonikordaja kahe tunnuse vahel on 0,74 ehk 74%. Sellise tulemuse saame, kui võrrelda kõiki andmeid. Siit järeldub, et seos kahe antud tunnuse vahel on väga suur. Kuidas saavad täiesti erinevad katsed olla nii suures korrelatsioonis? Põhjus on ilmselt kiilvaia kujus. Kui staatilisel katsel töötavad mõlemad kiilvaia külgtahud, siis vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul töötab rohkem ainult üks kiilvaia tahkudest. Tabelis on ka selgelt näha seda, kus horisontaalne kandevõime võrdub ligikaudu poole staatilise kandevõimega. Mõnel katsel see siiski nii ei väljendu. Põhjuseks on erinev pinnase veesisaldus ning see, et suurtel vertikaalkoormustel käitub katsevai peaaegu võrdselt ehk staatiline kandevõime ja horisontaalkandevõime on ligikaudu võrdsed.

Siiski võib katseandmete analüüsist öelda, et staatiline- ja horisontaalkandevõime võivad olla võrdsed. Katsete käigus arutleti selle üle, miks võib olla horisontaalkandevõime vertikaalkoormusel 90%, staatilisest kandevõimest ligikaudu võrdne staatilise piirkoormusega. Arvati, et kiilvai on vertikaalkoormuse juures muutunud niivõrd raskeks, et horisontaalkoormamisel peab rakendama rohkem jõudu. Koormates kiilvaia vertikaalselt 11,98kN ja samaaegselt horisontaalselt 2kN, lisades iga 5 minuti järel 2kN horisontaalkoormust, avaldus seos, et vajum ja siire on võrdsed. Sellise olukorra puhul võib järeldada, et kiilvaia ühel kaldtahul on liiva ruumiline pinge võrdne. Sellist olukorda ei tekkinud, kui koormused vertikaalselt olid väiksemad. Siis olid siirded suuremad ja vajumid väiksemad. Samuti väljendus liiva ruumipinge purunemispildina pinnase pealmistes kihtides, kus lõhenemisjooned avaldusid vaiapea külgedelt ligilähedaselt 90 kraadiste nurkadena. See näitas, et pinnast haarati rohkem kaasa, sest just olukordades, kus vertikaalkoormus oli kiilvaiale 50% või suurem staatilisest kandevõimest horisontaalkatsetustel.

Järgmisena koostati sarnaselt tabeli 3.5 põhjal andmete paremaks vaatlemiseks graafik, mida iseloomustab joonis 3.32.



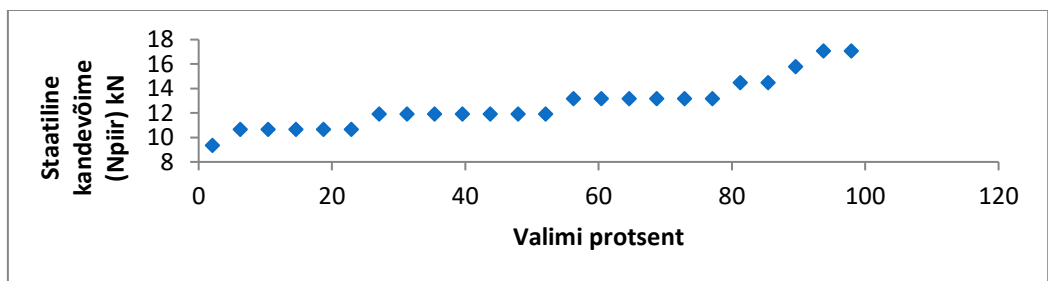
**Joonis 3.32** Horisontaalkandevõime ja staatilise kandevõime graafik

Graafikul esinevad punktid on küll erinevalt paigutatunud, kuid võib näha sarnasusi staatilise kandevõime graafikuga ehk on näha esinevat kõverust. Näeme, et punktid on laiali paigutatunud. Selleks, et paremat visuaalset graafikut näha, lisatakse graafikule trendijoon. Lisades lineaarse trendioone, näeme, et punktid paiknevad suhteliselt lähedal joonele. Antud trendioon kirjeldab andmesarja 54%, kuid trendijoon ei esita selle andmesarja andmeid. Antud graafiku põhjal võib öelda, et kui staatiline kandevõime on 11,89kN, siis horisontaalkandevõime on 54% tõenäosusega 6,82kN.

Lisaks graafiku koostamisele uuritakse ka statistiliste analüüsidega andmete sõltuvust, milleks kasutati regressioonanalüüsi. Siin kehtivad samad kriteeriumid. Vaadeldakse üht tunnust kui sõltuvat 1 ning püütakse leida tunnuseid, mille põhjal oleks võimalik kirjeldada ning ühtlasi ka prognoosida selle sõltuva tunnuse väärtusi. Kirjeldav mudel ning prognoos on seda täpsem, mida tugevamini sõltumatu tunnus sõltuva tunnusega on seotud. Järgnevalt on esitatud väljavõtte regressioonanalüüsist.

**Tabel 3.6.** Regressioonanalüüs staatilise kandevõime sõltuvus horisontaalkandevõimega

Regressioonanalüüs				
$R^2$	0,542659989	kirjelduse tase 0,54 %		
Kohandatud $R^2$	0,521871807			
Standardhälve	1,383519277	mudeli viga		
Vaatlus	24	analüüsitud valim		
	Koefitsient	Standardhälve	$t$ -statistik	$p$ -väärtus
Lõikepunkt	7,152922781	1,112515	6,429506	1,81E-06
cm	0,701264101	0,137254	5,109232	4,05E-05



**Joonis 3.33** Regressioonanalüüsi normaaljaotus

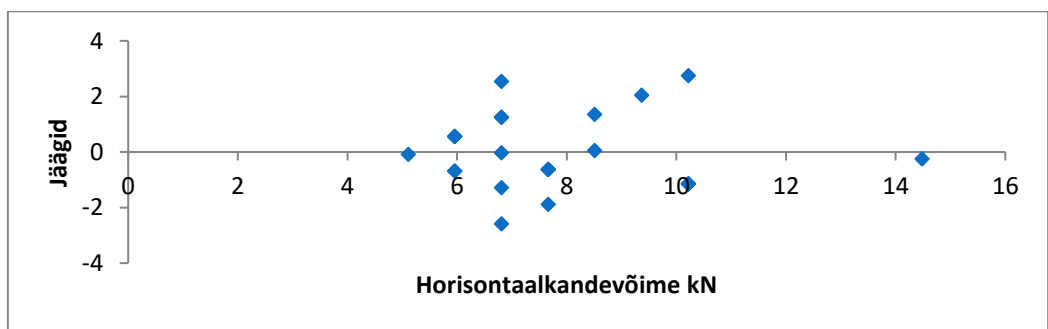
Normaaljaotuse diagramm on sujuv ning mudel on väga hea ja  $p$ -väärtused väga väikesed.

Kirjeldustase ja trendioone protsent langeb kokku 100%. Kirjutame välja mudeli.

$$MUDEL: R_{c,m} = 0,70 \cdot R_{c,h} + 7,15 \pm 1,38, \quad (7)$$

kus  $R_{c,m}$  – vertikaalkandevõime kN;

$R_{c,h}$  – horisontaalkandevõime kN.



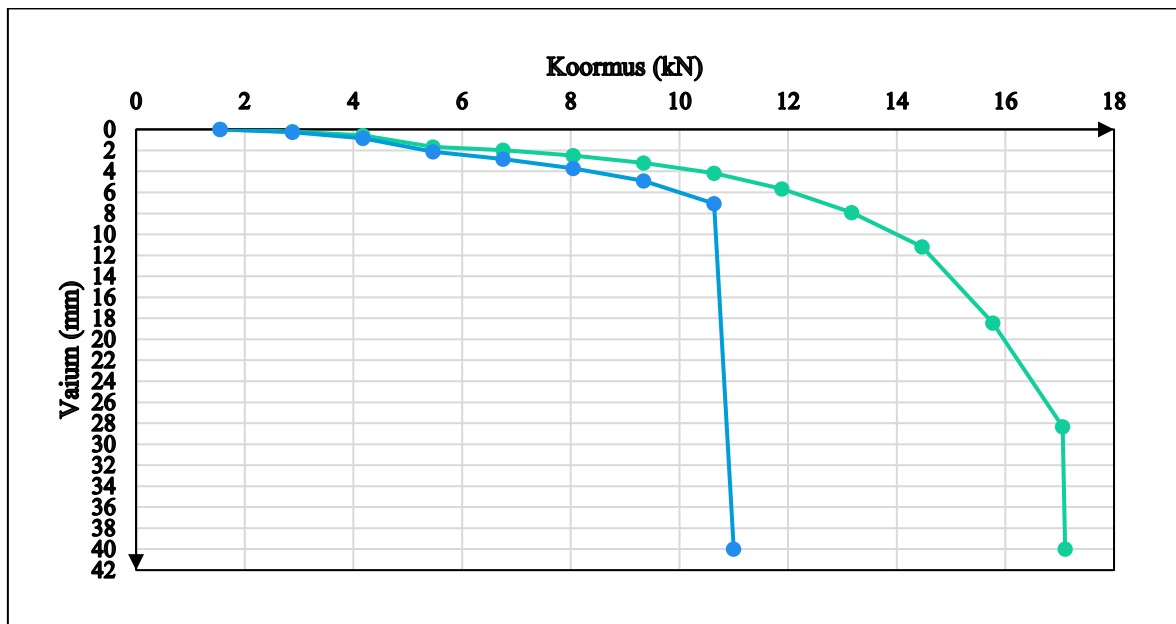
**Joonis 3.34** Horisontaalkandevõime jääkide diagramm

Horisontaalkandevõime jääkide diagrammil on jääkide arv võrdne ehk negatiivsete ja positiivsete jääkide arv on võrdne ning mudel on hea. Nende analüüside ja protseduuride põhjal võib öelda, et korrelatsioon on kahe tunnuse vahel tugev. Graafikust selgus, et punktid paiknevad lineaarjoonele suhteliselt lähedal.

### 3.6 Staatilised katsed märjas liivas

Katsetamisel juhtus selline olukord, kus pinnasekast ujutati üle. Olukord tekkis sellisel perioodil, kus Tartu linn oli tiheda vihma tõttu üleujutatud ja sadeveekanalisatsioonikaevud ajasid üle. Nii juhtus ka Maaülikooli laboris, kus katusele tekkis ohtralt vihmavett ja sadeveekanalisatsioon ei suutnud vihmavett vastu võtta ning vihmavesi tuli laborisse. Seega toimusid kolm katset pinnases, mis olid märjad.

Märjas pinnases olid staatilised katsetulemused ehk piirkoormused hoopis suuremad kui normaalolukorras pinnasel. Antud olukorra paremaks illustreerimiseks on esitatud joonisel 3.35 esitatud kaks joont, millest sinine on normaalolukorras katsetatud ehk niiskes pinnases.



**Joonis 3.35** KV40/6T Staatiliste koormuskatsete graafikud tihedas pinnases (märj pinnas)

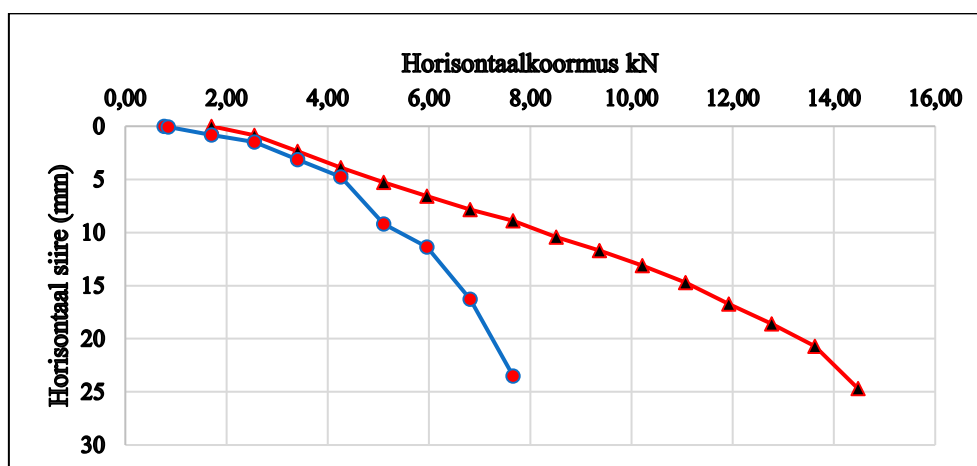
Graafikult saab piirkoormuste kohta välja lugeda järgmised tulemused:  $N_k = 4,17\text{kN}$ ,  $N_{pr} = 10,64\text{kN}$  ja  $N_{piir} = 17,10\text{kN}$ . Antud väärtused esitavad märjal liival katse tulemusi.

Normaalolukorras on tulemused järgmised:  $N_K = 4.17\text{kN}$ ,  $N_{pr} = 7.2\text{kN}$  ja  $N_{piir} = 10.64\text{kN}$ . Vahe  $N_{pr}$  ja  $N_{piir}$  on 3 kordne.

Arutleti tekkinud olukorra üle ka Roomelt Needoga, kes on peainsener AS Kurmikus ja kasutab täissuuruses kiilvau. Kas nemad on täheldanud samasuguseid muutusi? Roomelt kinnitas, et ka tema on täheldanud, et märjal pinnasel on staatiline kandevõime suurem. Samas mainis ta, et seda ei võeta arvutustes arvesse.

Selgitus sellele, miks staatiline kandevõime suureneb märjal pinnasel, on lihtne. Näiteks saab tuua liivalosside ehitamise. Liivaloss hoiab kindlalt antud vormi kuju, sest liivaosakeste vahel tekivad kapillaarsidemed, mis on tihedalt seotud. Samal viisil on liivaosakesed tihedamalt seotud ka pinnasekastis ning seega on kiilvaia raskem pinnasesse suruda. Kapillaarsidemed liivaosakeste vahel takistavad osakeste omavahelist liikumist. Selletõttu on ka kandevõime suurem.

Samuti suurenes horisontaalkandevõime vertikaalkoormaisel ehk vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju katsel (vt joonis 3.36).



**Joonis 3.36** Horisontaalkoormuse graafik märjas ja niiskes pinnases

Graafikul on esitatud kaks joont. Punane joon (kolmnurkse tähistusega) on katsetulemus märjal liival ja sinine (ring tähistus) niiskes pinnases. Antud vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju katsel oli vertikaalseks koormusastmeks  $9.34\text{kN}$  ja seda mõlema katse puhul. Mõlema katse juures on kasutatud samasuguseid meetodeid ja koormusi, kuid pinnase kapillaarniiskus on teine. Horisontaalkandevõime suureneb märjal pinnasel ligikaudu 2 korda. Nii staatilistel kui ka horisontaalsetel katsetel ei võeta neid tulemusi reaalselt arvutustesse arvesse.

## 4. ARUTELU

### 4.1 Dünaamilise kandevõime võrdlus staatilise kandevõimega

Võru KEK võttis 1977. aastal kasutusele kiilvaiad. Töörühm, kuhu kuulusid insenerid M. Mets ja A. Kuddu, arutasid erinevaid kandevõime valemeid läbi ning jäid lõpuks Gersevanovi poolt loodud valemi juurde, sest see sobis kõige paremini Eestis olevatele pinnastele. M. Mets ja A. Kuddu püüdsid paika panna suhet kiilvaia ja rammimisraskuse vahel. Erinevatest katsetustest selgus, et kiilvaia ja rammimisraskuse vahe peab olema vähemalt 1,5 kordne. See tähendab, et vasar peab olema kiilvaiast raskem vähemalt 1,5 korda. M. Metsa sõnul oli suhte paika saamise protsess väga aega nõudev.

Vares Erko uuris oma magistritöös „Kiilvaimudelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused” (2015) samuti dünaamilist kandevõimet kiilvaiadele ja arvutas vastavalt vastetele kandevõime, kasutades kandevõime hinnangu valemeid, milleks oli Gersevanovi valem ja Gate-Killar valem.

Teadupärast leidis Vares, E, et just Gersevanovi valem hindab päris täpselt mudelvaia kandevõimet võrreldes staatiliselt katsetatud andmetele.

Gersevanovi valemiga arvatud kandevõime mudelile KV40/6 kohevas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{500 \cdot 40,5}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,00757 \cdot 60}{150 \cdot 40,82 \cdot 0,4} \cdot \frac{0,00757 + 0,2 \cdot 0,003350}{0,00757 + 0,003350}} - 1 \right] \cdot 9,81 = 11,21 \text{ kN}$$

Staatilisest katsest sellele mudelile leitud tegelik  $N_{pr} = 11,5 \text{ kN}$ . E. Varese tulemus

Põhjus, miks saadi suhteliselt täpsed tulemused, on ilmselt tingitud sellest, et vaia ja rammi suhe oli 2,27.

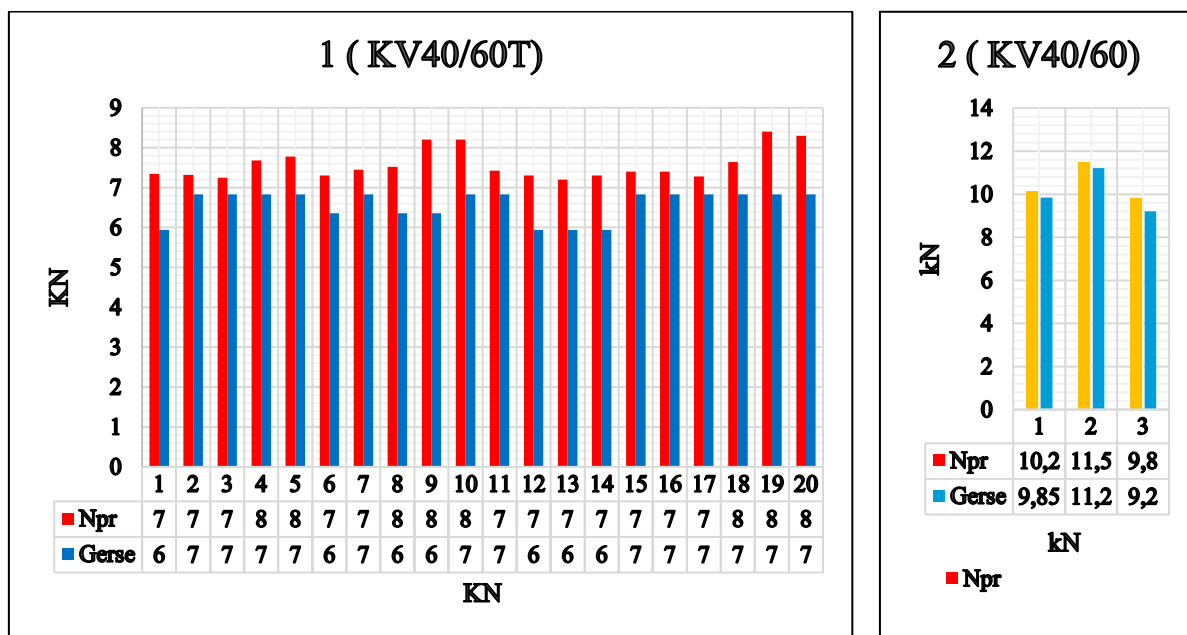
Antud töös ja katsetel ei ole kasutatud seda tingimust, et vasar oleks katsevaiast 1,5 korda raskem ja sellepärast ka selline tulemus:

Gersevanovi valemiga arvatud piirkoormus KV40/6T tihedas liivas:

$$R_{c;m} = \frac{500 \cdot 40,5}{2} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,00757 \cdot 60}{500 \cdot 40,5 \cdot 0,4} \cdot \frac{0,00757 + 0,2 \cdot 0,006968}{0,00757 + 0,006958}} - 1 \right] \cdot 9,81 = 6,87 \text{ kN}$$

Staatilisest katsest mudelile leitud  $N_{pr} = 7,11 \text{ kN}$ . Mainima peab siiski, et E. Vares katsetas betoonist kiilvaiamudeleid, kuid antud töös katsetati terasest mudelit ja teisel meetodil.

Järgnevalt on võrreldud tulpdigrammis katsetulemustest saadud  $N_{pr}$  ja Gersevanovi valemi järgi arvatud  $N_{pr}$ . (vt joonis 4.1)



**Joonis 4.1** Proportsionaalsuspiiride võrdlus

Tulpdigrammis 1 on 20 katse andmete tulemused KV40/60T, mida on võrreldud katsetel hinnatud proportsionaalsuspiiri ja Gersevanovi valemi järgi arvatud  $N_{pr}$ -ga. Teises diagrammis on betoonist mudelvai KV40/60, mida E. Vares oma töös katsetas kolm korda. Diagrammidest võib välja lugeda, et katsetatud betoonist mudelvaiadel on proportsionaalsuspiir suurem kui terasest mudelil. Kuigi katsed on tehtud erineva meetoodikaga, on andmed siiski võrreldavad.

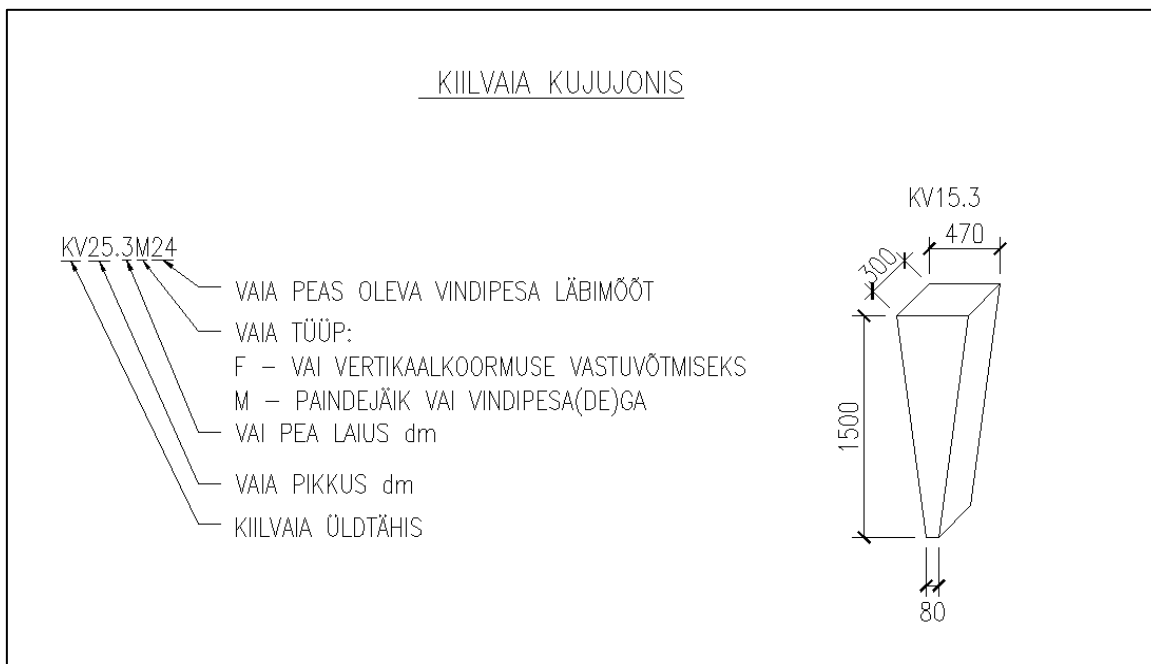


## 4.2 Katsetulemuste rakendamine

Erinevatest analüüsides ja graafikutest leitud seoseid püütakse rakendada antud peatükiks suurtele kiilvaiadele.

Esitletakse mõningad näited:

Reaalselt kasutatud täismõõtmes kiilvai tähistusega KV15.3M24 (vt joonis 4.2).



**Joonis 4.2** Kiilvai KV15.3

Antud kiilvaia rammiti ühel objektil diiselhaamer CH.75A masinaga, mille haamri kaal on 1,25t ja haamri kukumiskõrgus tagasipõrget arvestades 1.1m. Antud objektil saadi vaia keskmiseks vasteks 2,6cm. Kandevõime hindamiseks kasutati Gersevanovi valemit, mis on antud peatükiks 1.3 valem (1.1). Antud valemi põhjal saadi kiilvaia arvutuslikuks kandevõimeks 160kN. Antud kandevõime arvule on arvestatud tagavara tegurid.

Mudelvaial katsetati dünaamiliselt, staatiliselt ning horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul. Analüüsides saadi erinevaid mudeleid, mida proovitakse kasutada antud täissuuruses vaia puhul. Kasutame antud täissuuruses kiilvaia andmeid võrdluseks mudelkatsetustega.

#### Näide 4.2:

Dünaamilise katsetuse võrdlus:

$$MUDEL; N_{pr} = -5,42 \cdot S_e + 10,88 \pm 0,45$$

Mudelvaia vasted olid keskmiselt 0,42cm ja 1,5m, kiilvaial 2,6 cm. Seega on vahe 6 kordne. Antud mudeli arve suurendame sama võrra ja saame:

$5,42 \cdot 6 = 32,52$ ;  $10,88 \cdot 6 = 65,28$ ;  $\pm 0,45 \cdot 6 = \pm 3$  Asendame saadud arvud mudelisse, jättes mudeli vea samaks.

$$N_{pr} = 32,52 \cdot 2,6 + 65,28 \pm 3 = 150 \pm 3 \text{ kN}$$

Arvutuslik piirkandevõime ( $R_{c,m}$ )=160 kN, arvutatud Gersevanovi valemiga 1,5m vaiale objektil.

Mudelvaia katsed tehti liivpinnases ja suured vaiad löödi turvast sisaldavasse pinnasesse. Katsetuste käigus leitud mudel arvestab proportsionaalsuspiiri, mitte piirkandevõimet. Vahe seisneb selles, et arvutuslik kandevõime arvestatakse  $N_{piirist}$  tagavara teguritega tagasi (vt peatükk 1.5, joonis 1.10).

Edasises analüüsis proovitakse antud mudelvaia katsel saadud mudeli põhjal ka arvutada horisontaalkandevõime KV15.3-le. Mudelkatsetuste põhjal tuli välja, et staatiline kandevõime on suuresti korrelatsioonis horisontaalkandevõimega. Kasutame antud uuringus leitud mudeli valemit 1,5m kiilvaia jaoks.

#### Näide 4.3:

Arvutuslikult saadi KV15.3M24 staatiliseks kandevõimeks 160kN, maksimaalne vertikaalkoormus.

$$MUDEL; R_{c,h} = 0,28 \cdot V + 5,28 \pm 1,16$$

$$Horisontaalkandevõime(R_{c,h}) = 0,28 \cdot 160 + 5,28 \pm 1,16 = 50,08 \pm 1,16 \text{ kN}$$

Mudelarvutus näitab, et KV15.3M24 horisontaalkandevõime on  $5,02 \pm 0,12 \text{ t}$ .

1987a. Nursi katsepolügoonil saadi maksimaalselt 10t horisontaalkandevõimeks, kuigi seal katsetati 2m kiilvaiau.

Maksimaalse horisontaalkandevõime leidmisel tuleb antud mudel korrutada vaia pikkusega.

$$MUDEL; R_{c,h} = (0,28 \cdot V + 5,28) \cdot L \pm 1,16kN$$

$$Horisontaalkandevõime(R_{c,h}) = (0,28 \cdot 160 + 5,28) \cdot 1,5 \pm 1,16 = 75,12 \pm 1,16kN$$

Antud mudeleid ei ole soovituslik enne kasutada, kui on olemas reaalsed katsetused täissuuruste vaiade kohta. Aluseks võib võtta selle, et staatilisest kandevõimest pool võrdub horisontaalkandevõimega. Lisaks võib täheldada, et staatilisest kandevõimest 50-60% vertikaalkoormuse juures on horisontaalkandevõime 25% suurem.

### 4.3 Mudelkatsetuste võrdlus

Järgnevalt võrreldakse artiklist „Pile Behavior under Inclined Compressive Loads—A Model Study“ väljatoodud peatükis 1.6 mudelkatsetusi käesoleva magistritöö raames läbiviidud katsetega. George Geoffrey Meyerhof (1972) uuris üksikvaiale rakendatud hilisemaid koormusi, mis mõjusid kaldu, ta väljendas seda olukorda empiirilise valemiga. [10]

$$\left(\frac{P_v}{P_u}\right)^2 + \left(\frac{P_h}{P_H}\right)^2 = 1, \quad (3)$$

kus  $P_v$  – vertikaalkoormus;

$P_h$  – horisontaalkoormus;

$P_u$  – staatiline kandevõime;

$P_H$  – horisontaalkandevõime.

Antud valemit rakendatakse mudelkiilvaiadele, kus katsetel saadud andmed lisatakse valemisse. Enne valemisse lisamist on esitatud tabel 4.3, mis esindab kiilvaia katse andmeid.

**Tabel 4.3** Kiilvaia katse andmed

Katse number	Staatiline kandevõime (kN)	Horisontaalkandevõime (kN)	Vertikaalkoormus (kN)	Resultantjõud (kN)	Resultandi nurk
1	13,17	6,81	2,88	7,39	22,92
2	13,17	6,81	2,88	7,39	22,92
3	14,47	6,81	2,88	7,39	22,92
4	11,89	5,96	4,17	7,99	34,98
5	11,89	5,96	4,17	7,99	34,98
6	9,34	6,81	4,17	7,27	31,48
7	10,64	5,96	5,47	8,09	42,55
8	10,64	5,96	5,47	8,09	42,55
9	10,64	6,81	5,47	8,73	38,77
10	14,47	8,51	6,75	10,86	38,42
11	13,17	8,51	6,75	10,86	38,42
12	11,89	6,81	6,75	9,59	44,75
13	17,06	10,22	8,04	9,53	38,19
14	15,77	9,37	8,04	11,1	40,63
15	10,64	5,11	8,04	10,01	57,56
16	17,06	14,48	9,34	12,08	32,82
17	10,64	7,66	9,34	12,08	50,64
18	11,89	5,96	9,34	12,08	57,46
19	11,89	7,66	10,64	14,75	54,25
20	11,89	7,66	10,64	14,75	54,25
21	11,89	7,66	10,64	14,75	54,25
22	13,17	10,22	11,89	11,89	49,32
23	13,17	10,22	11,89	11,89	49,32
24	13,17	10,22	11,89	11,89	49,32

Antud valemisse (3) asendatakse tabelist leitavad andmed ja esitatakse 3 näite arvutust erinevate andmete puhul.

*Näide 4.4:*

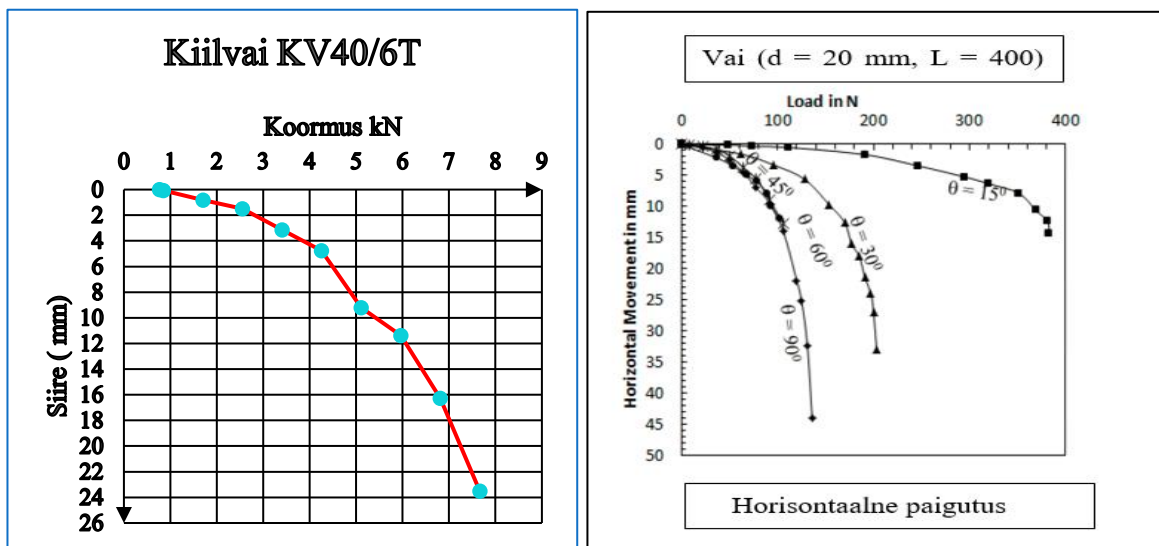
$$(2,88/13,17)^2 + (2/6,81)^2 = 0,13$$

$$(5,96/10,64)^2 + (4/5,47)^2 = 0,84$$

$$(10,64/11,89)^2 + (6/7,66)^2 = 1,41$$

Antud Meyerhof'i valemi põhjal võib öelda, et see valem ei sobi mudelkiilvaiale.

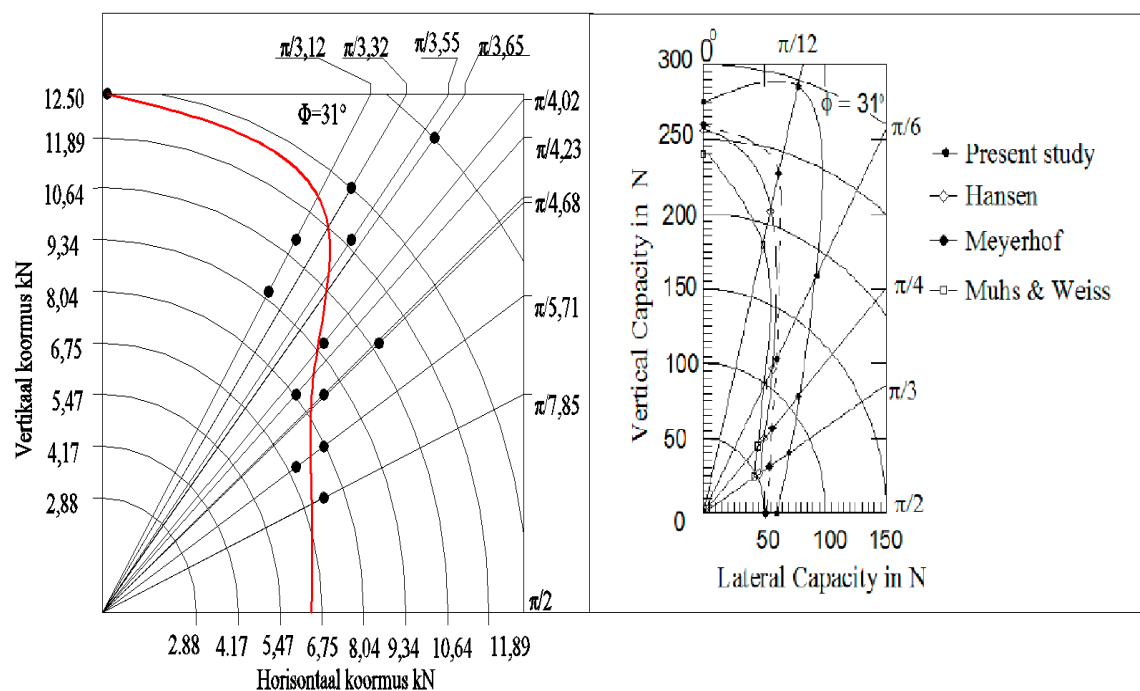
Järgnevalt on esitatud kaks graafikut (vt joonis 4.3), kus on võrdlusena vaadeldud silindrikujulist vaia ja kiilvaia. Silindrikujulise vaia mõõtmed on läbimõõduks 20mm ja pikkusega 400mm. Kiilvaia mõõtmed on kirjeldatud peatükiks 2.1. Kiilvaia ja silindervaia pikkused on sarnased. Mainima peab, et kiilvaia ruumala on  $1632\text{cm}^3$  ja silindervaia ruumala on  $503\text{cm}^3$ , seega on ruumalade vahe üle 3 korra.



**Joonis 4.3** Kiilvaia ja silindervaia horisontaalkoormuse graafikud

Graafikutel on näha, et kiilvaiamudelil on horisontaalkoormus kN, kuid silindervaial N. Silindervaiale rakendati maksimaalselt horisontaalkoormust 400N vastavalt graafikule, kuid modelkiilvaiale rakendati maksimaalselt horisontaalkoormust 7,66kN samuti vastavalt graafikule. Vahemikud on mitmetuhandekordsed, kui neid omavahel võrrelda. Põhjus, miks kiilvai võtab kordades rohkem horisontaalkoormust vastu, on ilmselt tingitud mitmest tegurist. Üks kindel põhjus on ruumalade 3 kordne suuruste vahe. Isegi, kui kiilvaia horisontaalkoormuse lõpliku kandevõime arvu jagada kolmega, on vahed liiga suured, et katseid võrrelda.

Autorid lisasid polaarsesse skeemi katsetatud vaia andmed (vt lk -29). Polaarne skeem on jaotatud vastavalt katsetatud nurkadele, kuna kiilvaiu ei katsetatud sarnasel katseseadmep, siis esitatakse selle kohta paigutusskeem. Parema ülevaate annab kõrvale paigutatud polaarskeem (vt joonis 4.4).



**Joonis 4.4** Vertikaal-ja horisontaal koormuse paigutusskeem (KV40/6T)

Antud skeemilt on näha, et mudelkiilvair on koormatud erineva vertikaalkoormuse juures ja surutud horisontaalselt. Vertikaal -ja horisontaalkoormuse koosmõjul tekib resultantjõud, mis on tähistatud skeemil ( $\pi/n^0$ ), kus  $\pi = 180^0$ . Antud paigutusskeem on mingil määral sarnane polaarse skeemiga, kuna vertikaal-ja horisontaalkomponentidest moodustub resultantjõud, mis on sarnane artiklis räägitud nurkade all katsetustele. Kiilvaia paigutusskeemist on näha, et vertikaalkoormuse juures 6,75kN paigutuvad punktid paremale poole. See on tingitud kiilvaia eripärast ja tingimusest, et vertikaalkoormuse kasvades kasvab ka horisontaalkandevõime. Nii nagu peatükiks 3.4 joonisel 3.27 oli näha kahte erinevat tsooni, on ka antud paigutusskeemist näha antud tsoone, millest esimene pool moodustab lineaarse liikumise ja edaspidi mittelineaarse liikumise.

Paigutusskeemist leiti seos ja esitatakse valem.

$$R_{c,k} = F \cdot \cos \alpha$$

$$R_{c,h} - R_{c,k} = 0 \quad (7)$$

kus  $R_{c,k}$  – Arvutuslik horisontaalkandevõime;

$R_{c,h}$  – katsetel saadud horisontaalkandevõime;

F – resultantjõud.

Antud valemist leiti seos, et vertikaal- ja horisontaaljõu komponendist moodustuv resultantjõud ja tekkinud koosinusnurga korrutis on võrdne horisontaalkandevõime piiriga.

Esitatakse 2 näite lahendust, kus andmed on võetud paigutusskeemilt ja tabelist 4.3:

*Näide 4.5:*

1. $R_{c,k} = F \cdot \cos \alpha$	$R_{c,h} - R_{c,k} = 0$
$F = \sqrt{(2,88^2 + 6,81^2)} = 7,39$	$6,81 - 6,81 = 0$
$\alpha = \pi/n^0 = 180 / 7,85 = 22,92^0$	
$R_{c,k} = 7,39 \cdot \cos 22,92 = 6,81 \text{ kN}$	
2. $R_{c,k} = F \cdot \cos \alpha$	$R_{c,h} - R_{c,k} = 0$
$F = \sqrt{(6,75^2 + 8,51^2)} = 10,86$	$8,50 - 8,51 = -0,01$
$\alpha = \pi/n^0 = 180 / 4,68 = 38,46^0$	
$R_{c,k} = 10,86 \cdot \cos 38,46 = 8,50 \text{ kN}$	

Antud näidete põhjal, mis on leitud paigutusskeemist, lähevad arvutused hästi kokku antud valemiga. Kontrollime antud valemi kehtivust M. Linde poolt katsetatud vaiale, kus ta katsetas mudelkiilvau horisontaalselt, ilma vertikaalkoormuseta.

*Näide 4.6:*

1. $R_{c,k} = F \cdot \cos \alpha$	$R_{c,h} - R_{c,k} = 0$
$F = \sqrt{(6^2 + 9,11^2)} = 10,90$	$6 - 5,99 = 0,01$
$\alpha = 56,63^0$	
$R_{c,k} = 10,90 \cdot \cos 56,63 = 5,99 \text{ kN}$	

Kahel katsel oli tegelik  $H_{r;k} = 6 \text{ kN}$  ja ühel katsel  $4,17 \text{ kN}$ . Antud kontrolli põhjal sobib valem samuti ilma vertikaalkoormuseta olukorra jaoks.

## Kokkuvõte

Kiilvaiadega ei ole tehtud katseid, mis oleks vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul koormatud. Käesolevas töös uuriti labori pinnasekastis vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõju kiilvaimudelile. Lisaks uuriti katsete käigus dünaamilist kandevõimet ja staatilist kandevõimet. Kõik katsed viidi läbi mudeliga KV40/6T, mis on 2m kiilvaia 5 kordne vähendatud mudel. Pinnasekastis olev liiv tihendati eelnevalt. Kõikide katseliikidega sooritati kolm katset. Nende tulemuste järgi tehti järeldusi ja anti hinnanguid. Katsetused, mis toimusid küllastunud veega pinnasekastis, jäeti järelduste tegemiseks välja. Kõik ülejäänud katsed õnnestusid.

Põhieesmärgiks oli uurida põhjalikult mudelvaiade käitumist horisontaal- ja vertikaalkoormuse koosmõjul ja anda vastavad hinnangud. Eesmärk oli katsetuste tulemusena teada saada, kas vertikaalkoormamisel horisontaalkandevõime väheneb, suureneb või jääb hoopis konstantseks. Töö kõrvaleesmärkideks oli uurida dünaamilistel katsetustel saadud vasteid ja staatilistel koormuskatsetel saadud kiilvaia kandevõime vahelist seost. Eesmärkide saavutamiseks viidi läbi järgmised protsessid:

1. Tutvuti varasema teemaalase kirjandusega.
2. Töötati välja koormuskatseseade, mille abil oleks võimalik üheaegselt koormata kiilvaia vertikaal- ja horisontaalsuunas. Hangiti vajalikud koormused ja katseseadmed.
3. Töötati välja tegevuskava katsete läbiviimiseks.
4. Laboris olev pinnas valmistati ette ja seati paika koormuskatseseade.
5. Tegevuskava järgi viidi läbi katsetusringid kõikidel erinevatel katsetel, mis tehti kiilvaimudelile tihedas liivas.
6. Analüüsiti andmeid, koostati graafikud, esitati tulemused ja arutleti tulemuste üle.

Katsetulemustest selgus, et kiilvaimudel käitub vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul hoopis erinevalt kui esialgu arvati. Selgus, et vertikaalkoormuse suurendamisel suureneb ka horisontaalkandevõime. Kõige olulisem oli välja selgitada, kas vertikaal- ja horisontaalkoormuse koosmõjul on horisontaal ja vertikaalkandevõime graafik lineaarne või mitte. Selgus, et graafiku joone moodustab kolmanda astme polünoom, mis on „S“ kujuline ja moodustab graafiku joone kõveraks. Katseandmete analüüsist esitati mudel ehk valem



arvutusliku horisontaalkandevõime määramiseks mudelkiilvaiale. Töös leiti, et George Geoffrey Meyerhof'i(1972) avaldatud valem ei sobi kiilvaimudelile. Töös avaldatud paigutusskeem on mingil määral sarnane polaarsele skeemile, kuna vertikaal -ja horisontaalkomponentidest moodustub resultantjõud, mis on sarnane välismaises kirjandusestehitud nurkade all katsetustele. Koostatud paigutusskeemist esitati valem. Antud valemist leiti seos, et vertikaal- ja horisontaaljõu komponendist moodustuv resultantjõud ja tekkinud koosinusnurga korrutis on võrdne horisontaalkandevõime piiriga. Katsetulemustest selgus, et pinnase purunemisnurk kiilvaia pea juures on väga erinev, kui vertikaalkoormus on muutuv. Koormates vaia kuni 40% staatilisest kandevõimest, puruneb pinnas ligilähedale 45 kraadiste nurkade alt kiilvaia pea juurest, kuid lisades vertikaalkoormust 50-90% staatilisest kandevõimest, suureneb purunemisnurk pinnasel 90 kraadiste joontena kiilvaia pea juurest. Ühtlasi tähendab see seda, et vaia horisontaalkoormaisel on pinnase vastupanu suurem, kuna pinnast haaratakse rohkem kaasa. Katsetulemuste analüüsist selgus, et horisontaalkandevõime suureneb kui rakendada vertikaalkoormust 50-60% staatilisest kandevõimest antud katsevaiale.

Töö kõrvaleesmärkide täitmiseks teostati dünaamilise ja staatilise kandevõime uurimine. Dünaamilistest katsetustest saadud vastetest arvutati staatiline kandevõime ja kontrolliti staatiliste katsetuste andmetega. Selgus, et soovitatav on kasutada Gersevanovi valemit, mis andis mudeli proportsionaalsuspiir kohta täpseid hinnanguid. Dünaamiliste ja staatiliste katseandmete põhjal esitati mudel ehk valem arvutusliku staatilise kandevõime määramiseks.

Uuriti kahe täiesti erineva katse seost, vertikaal -ja horisontaalkoormuse koosmõju katse ja staatiline katse seost. Selgus, et täiesti erinevatel katsetel on väga tugev korrelatsioonikordaja. Põhjuseks võib olla kiilvaia eripärane kuju, kuid see on autori enda arvamus. Tähtsam moment võib olla see, et arvestades tugevat korrelatsiooni kahe katse vahel, võib arvata, et täissuurustel kiilvaiadel võib see sama seos ühtida. Arvutades täissuuruses kiilvaiadele kandevõimet läbi vastete Gersevanovi valemi järgi ja teades tugevat korrelatsiooni vertikaalkoormuse ja horisontaalkandevõime vahel, suudetakse arvutada kiilvaia horisontaalne kandevõime. Antud seoste ja arutelu kohta on samuti leitud analüüsist mudel ehk valem.

Kõikidest katsetulemustest esitati statistiline mudel ehk valem arvutamaks tekkinud olukordi. Valemid on saadud katsetades ühte tüüpi mudelvaia kindlaks määratud liivpinnasel, mis tihendati eelnevalt katsetamisel.

Antud töö annab kiilvai kasutajatele olulisi tugipunkte, mis katsetuste käigus leiti. Erilise tähtsusega on see, et katsetustest selgus, et horisontaalkandevõimegraafik on kõver kui vaiale rakendatakse vertikaalkoormust. Töös kasutatud meetodid olid sobilikud antud probleemide uurimiseks ja järelduste tegemiseks. Edaspidisteks uurimusteks võiks uurida CPT katsetulemuste ja kiilvaia kandevõime vahelisi seoseid.

## Kasutatud kirjandus

1. Jaaniso, V. (2006). *Geotehniline projekteerimine, EVS-EN 1997-1:2006. Eurokoodeks 7, osa 1: Üldeeskirjad*. Tallinna Tehnikaülikool, Ehitiste Projekteerimise Instituut, Eesti Standardikeskus.
2. *Kiilvaiade horisontaalkandevõime uurimine Nursi katsepolügoonil*. (1987). Vabariiklik koondis „Eesti kolhoosehitus“ projekteerimise instituut EKE projekt. Tartu osakond.
3. Killar, E., Mets, M., Vares, J. (1977). *Vaia kandevõime määramise võimalustest rammimisandmeil. Ehitusgeoloogia kogumik, IV*. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. lk 176-182.
4. Mets, M. (1977). *Vaia kandevõime. Ehitusgeoloogia kogumik, IV*. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. lk 160-175.
5. Needo, R., juh. prof. Kaevats, Ü. (2008). *Kiilvaivundamendid – mis oli, on ja mis võiks olla*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, Humanitaar- ja Sotsiaalteaduste Instituut, Filosoofia õppetool.
6. Needo, A., Mets, M., Kärk, J., Kuddu, A.-A. (1991). *Kiilvaivundamendid. Ehitusgeoloogia kogumik, V*. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“. lk 138-145.
7. Needo, A., Väli, T., Needo, E., Jaaniso, V., Kuddu, A., Mets, M., Kark, J. (1986). *Kiilvaivundamendtide arvutamise, projekteerimise ja ehituse instruksioon, VEN 57-86*. Tallinn: ENSV Ministrite Nõukogu Riiklik Ehituskomitee.
8. *Pile Behavior under Inclined Compressive Loads—A Model Study*. (2013). Publisher: Bund. K. Vol 18, p 2188-2200. <http://www.ejge.com/2013/Ppr2013.208alr.pdf>
9. Rohusaar, J., Mägi, R., Masso, T., Talvik, I., Jaaniso, V., Otsmaa, V., Voltri, V., Loorits, K., Peipmann, T., Pukk, O., Õiger, K., Just, E., Just, A., Hartšuk, V. (2012). *Ehituskonstruktori käsiraamat. 9.6.2. Üksikvaia kandevõime*. Tallinn: „Ehitame“. lk 242-243.
10. Tammemäe, O., juh. Mets, M. (2003). *Kiilvaiad Lõuna-Eesti moreenpinnases*. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Energeetikateaduskond.
11. Tammemäe, O., Listra, E., Väli, T., Ong, H. (1991). *Kiilvaiade kandevõime. Ehitusgeoloogia kogumik, V*. T: Masso, T., K: Soonurm, E., Vilo, A. Tallinn: „Valgus“, lk 146-156.

12. Таммемяе, О. / Tammemäe, O., Листра, Э. / Listra, E., Кильдер, П. / Kilder, P., Тальвисте, П. / Talviste, P., Нийн, А. / Niin, A. Нийн / A.Niin. (1987). *Инженерно геологический отчёт. Рекомендации по оценке инженерно-геологических свойств слабых разновидностей морен для целей строительства на примере Эстонской ССР (слабые моренные грунты)*. Работа № 4266X/4456X. Таллин: Государственный институт инженерных изысканий.
13. Vares, E., juh. doktor. Mets, M. (2015). *Kiilvaimudelite kandevõime liivas ja süvistamisel toimuvad pinnasemuutused*. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool Tartu Kolledž. Säätva tehnoloogia õppetool.

# **Investigation of interaction of vertical and horizontal loads in testing the wedge pile model**

## **Summary**

Wedge piles have not yet been tested under the concurrence of vertical and horizontal loads. This thesis researched the concurring effects of vertical and horizontal loads on wedge piles placed in a soil box in controlled lab environment. In addition to that, the experiments assessed dynamic bearing capacity and static bearing capacity. All experiments were carried out with the model KV40/6T, which is a reduced model of a 2 m long wedge pile. The sand in the soil box was previously compressed. All types of experiments were carried out three times. Conclusions and assessments were made based on the experiment results. Experiments, that took place in a soil box saturated with water, were discarded while drawing conclusions. The rest of the experiments were carried out successfully.

The main goal of the thesis was to thoroughly research the concurring effects of horizontal and vertical loads on wedge piles and assess the results. The aim of the experiments was to determine, whether during the increase of vertical loads, the horizontal bearing capacity decreases, increases or remains unchanged. The thesis also focused on researching the connections between dynamic experiment results and the static load bearing of wedge piles. The following process helped to achieve the aforementioned goals:

1. Familiarizing with pre-existing academic publications.
2. Developing a bearing load device, which would apply force to the wedge pile in both vertical and horizontal directions at the same time. Setting up necessary weights and experiment devices.
3. Developing an action plan to carry out experiments.
4. The soil was prepared in the lab and set up with the bearing load devices.
5. According to the action plan, a series of experiments were carried out in compressed sand.
6. The collected data was analysed and presented in the form of graphs. A discussion of the research results followed.

The experiment results showed, that vertical and horizontal loads affect the model wedge pile differently than originally expected. It appeared, that increasing the vertical load also increases horizontal bearing capacity. The most important goal was to determine, whether the concurrence of vertical and horizontal loads appear linear on the vertical bearing capacity graph or not. The graph turned out to be a third degree polynomial, which is an S-shaped curve on the graph. The analysis of the experiment results provided a model or formula, with which to calculate the horizontal bearing capacity of the model wedge pile. The research confirmed, that George Geoffrey Meyerhof's (1972) published formula does not apply to the model wedge pile. The placement scheme used in the experiments reminds a polar scheme, as vertical and horizontal components form a resultant force, which is similar to the angled experiments carried out in foreign academic researches. The placement scheme was used to develop a formula. The given formula brought to light that the product of the resultant force of vertical and horizontal components and the cosine angle is equal to the limit of horizontal bearing capacity. The experiment results showed, that the breaking angle of the soil near the upper part of the wedge pile is very different, depending on the changes in vertical load. Applying up to 40% of static bearing capacity results in 45 degree angled breaks in the soil near the upper part of the wedge pile. However, adding vertical load 50-90% of static bearing capacity increases the breaking angle up to 90 degrees near the upper part of the wedge pile. Consequently, this means that the resistance of soil increases when applying horizontal loads to the wedge pile. The analysis of the experiment results showed, that the horizontal bearing capacity increases, when vertical loads of 50-60% of static bearing capacity is applied to the wedge pile.

In order to achieve the secondary goals of the thesis, experiments with dynamic and static bearing capacity were carried out. Static bearing capacity was calculated using the results of the dynamic bearing capacity experiments and compared to the data from static bearing capacity experiments. It appeared, that the Gersevanov formula is the most suitable, as it provided the most accurate assessments about the model's proportional limit. A formula to calculate static bearing capacity was based on the dynamic and static experiment results. Followingly, the connection between vertical and horizontal loads and static bearing capacity was researched. These two completely different experiments had a significant correlation coefficient. The author's opinion on the reasons for significant correlation coefficient is the unique shape of wedge piles. Taking into account the strong correlation between two experiments, it can be concluded, that this connection might also apply to full scale wedge

piles. Using the Gersanov formula to calculate the bearing capacity of full scale wedge piles with the addition of the strong correlation between vertical loads and horizontal bearing capacity, the horizontal bearing capacity of the wedge pile can be calculated. The analysis introduces a formula based on these findings.

A statistical model or formula was based on all experiment results. The formulas were created by testing a single type of model wedge pile in a compressed sand soil. This thesis provides the users of wedge piles with useful and important basic knowledge determined through experiments. The most significant of the results is that the graph of horizontal bearing capacity is curved when vertical loads are applied to the wedge pile. Research methods used in this thesis were suitable for given hypotheses and drawing conclusions. Future research on this topic could focus on connections between CPT experiment results and the bearing capacity of wedge piles.

**Lisad**



## Lisa 1. Katseprotokollid

Uurimistöö: Mudelkiilvaia uurimine horisontaal ja vertikaalkoormuse koosmõjul

Katsetaja: Tarko Jõgis

Märkused:

### 1. Dünaamiline katse

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

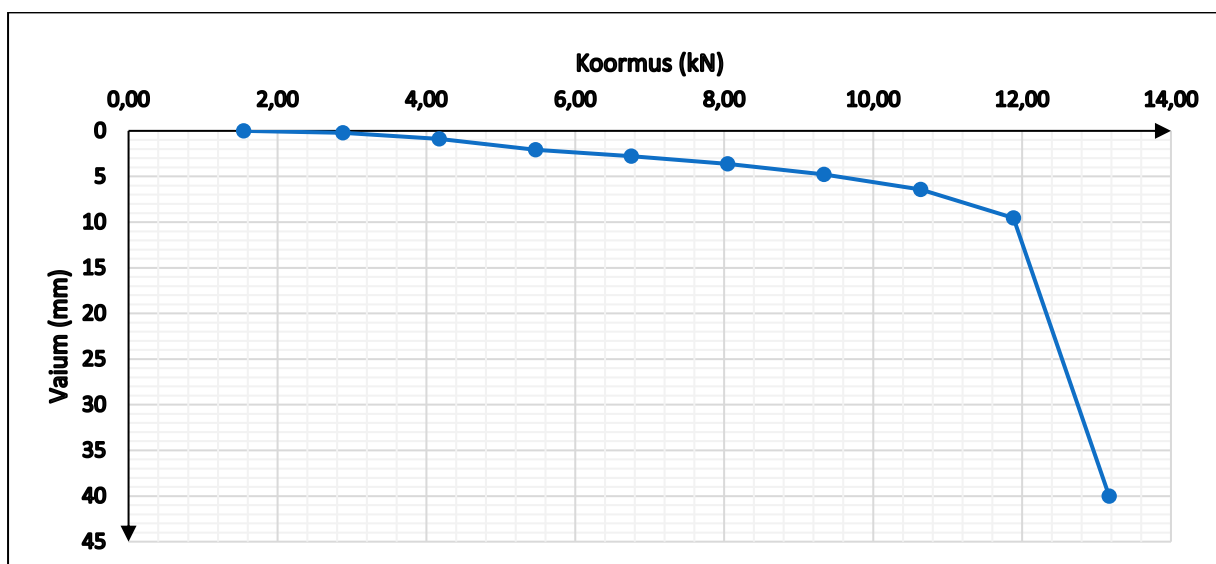
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,6	0,53
2	3	1,4	0,46
3	3	1,4	0,46

### 2. Staatiline koormuskatse

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	3,6	0
		2	3,6	0
		5	3,6	0
1	2,88	0	3,83	0,23
		2	3,83	0,23
		5	3,83	0,23
2	4,17	0	4,41	0,81
		2	4,46	0,86
		5	4,48	0,88
3	5,47	0	5,52	1,92
		2	5,65	2,05
		5	5,67	2,07
4	6,75	0	6,2	2,6

		2	6,35	2,75
		5	6,36	2,76
5	8,04	0	6,9	3,3
		2	7,17	3,57
		5	7,21	3,61
6	9,34	0	7,85	4,25
		2	8,27	4,67
		5	8,36	4,76
7	10,64	0	9,2	5,6
		2	9,89	6,29
		5	10,02	6,42
8	11,89	0	11,1	7,5
		2	12,7	9,1
		5	13,13	9,53
9	13,17	0	44	40,4



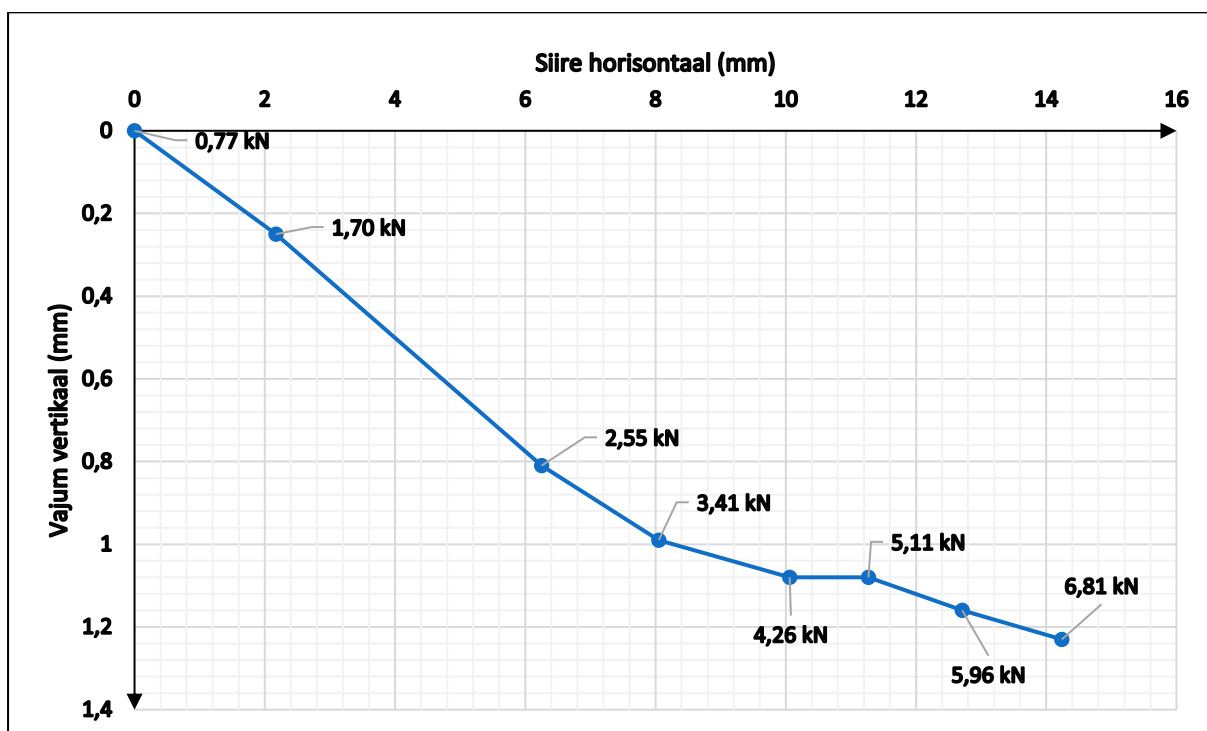
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

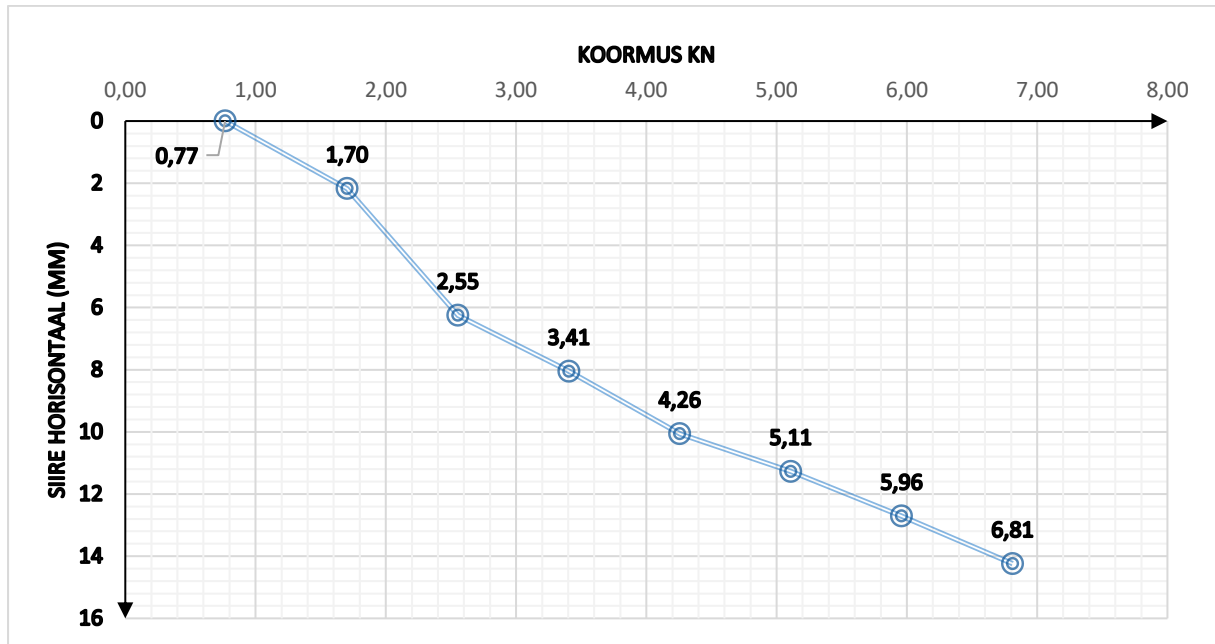
Vertikaalkoormus 2,88 kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,8	0,91	0,77	17,01	43,79	0	0
	2	1,8	0,91	0,77	17,01	43,79	0	0
	5	1,8	0,91	0,77	17,01	43,79	0	0
1	0	4	2,02	1,70	18,7	43,57	1,69	0,22
	2	4	2,02	1,70	19	43,54	1,99	0,25

	5	4	2,02	1,70	19,18	43,54	2,17	0,25
2	0	6	3,03	2,55	20,13	43,04	3,12	0,75
	2	6	3,03	2,55	23,13	42,98	6,12	0,81
	5	6	3,03	2,55	23,26	42,98	6,25	0,81
3	0	8	4,04	3,41	24,6	42,82	7,59	0,97
	2	8	4,04	3,41	25,05	42,81	8,04	0,98
	5	8	4,04	3,41	25,06	42,8	8,05	0,99
4	0	10	5,05	4,26	26,2	42,71	9,19	1,08
	2	10	5,05	4,26	26,95	42,71	9,94	1,08
	5	10	5,05	4,26	27,07	42,71	10,06	1,08
5	0	12	6,06	5,11	27,82	42,71	10,81	1,08
	2	12	6,06	5,11	28,23	42,71	11,22	1,08
	5	12	6,06	5,11	28,28	42,71	11,27	1,08
6	0	14	7,07	5,96	29,12	42,63	12,11	1,16
	2	14	7,07	5,96	29,7	42,62	12,69	1,17
	5	14	7,07	5,96	29,72	42,63	12,71	1,16
7	0	16	8,08	6,81	30,52	42,56	13,51	1,23
	2	16	8,08	6,81	31,21	42,56	14,2	1,23
	5	16	8,08	6,81	31,25	42,56	14,24	1,23



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik



Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

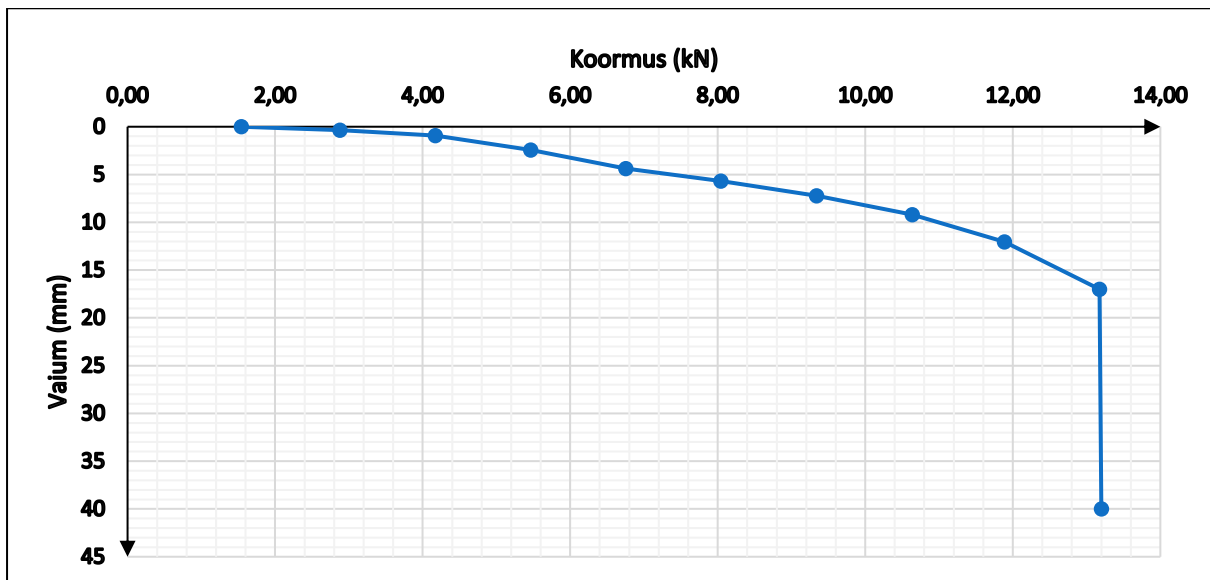
Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,1	0,36

**2. Staatileine koormuskatse**

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	10,59	0
		2	10,59	0
		5	10,59	0
1	2,88	0	10,92	0,33
		2	10,96	0,37
		5	10,96	0,37
2	4,17	0	11,44	0,85
		2	11,5	0,91
		5	11,5	0,91
3	5,47	0	12,87	2,28
		2	12,99	2,4
		5	13,02	2,43
4	6,75	0	14,59	4
		2	14,92	4,33
		5	14,98	4,39
5	8,04	0	15,6	5,01
		2	16,15	5,56
		5	16,26	5,67
6	9,34	0	16,91	6,32
		2	17,65	7,06
		5	17,8	7,21
7	10,64	0	18,06	7,47
		2	19,55	8,96
		5	19,8	9,21
8	11,89	0	20,25	9,66
		2	22,28	11,69
		5	22,65	12,06

9	13,17	0	23,65	13,06
		2	26,81	16,22
		5	27,61	17,02
9	13,17	5	51	40,41



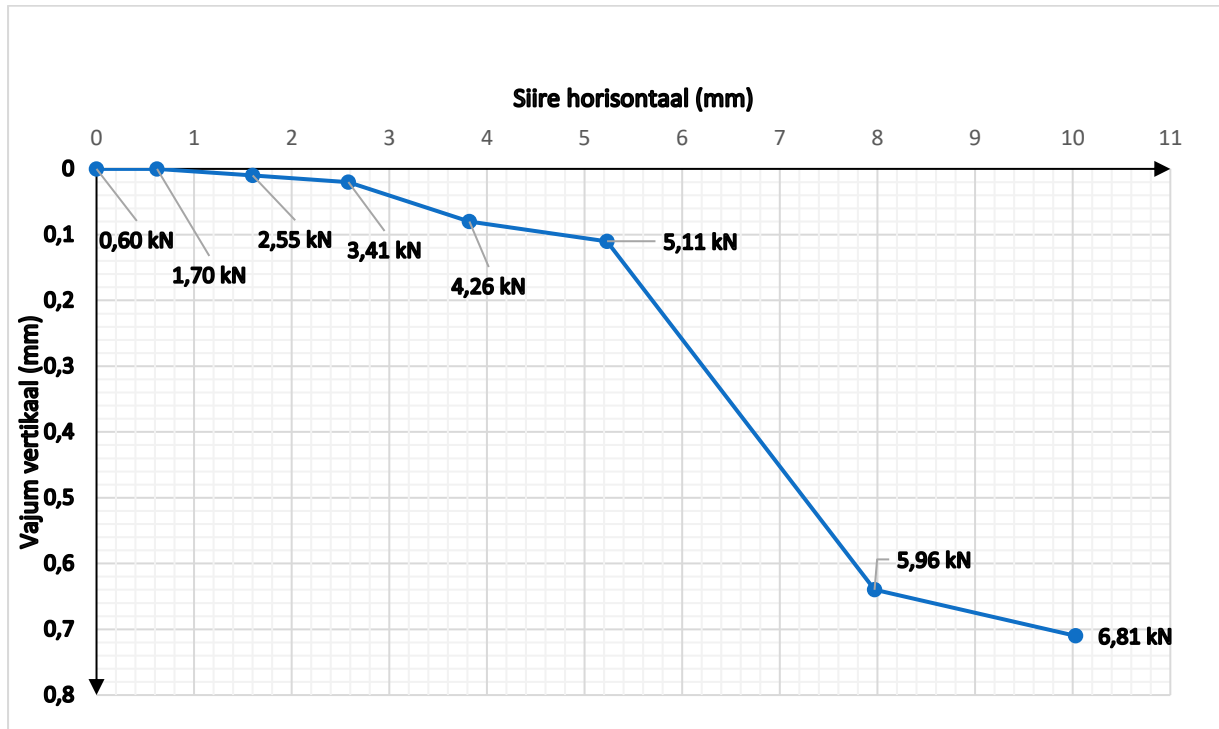
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 2,88 kN

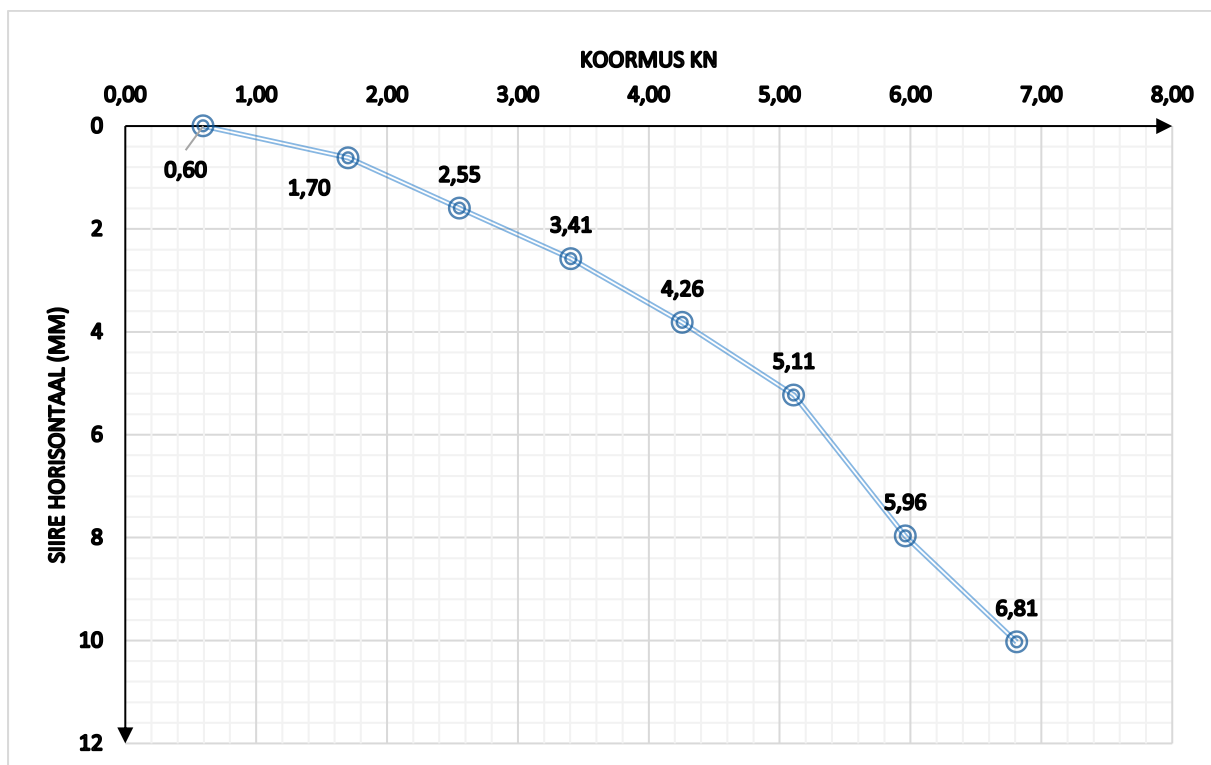
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,4	0,71	0,59	2,57	52,73	0	0
	2	1,4	0,71	0,59	2,57	52,73	0	0
	5	1,4	0,71	0,59	2,57	52,73	0	0
1	0	4	2,02	1,70	3,1	52,73	0,53	0
	2	4	2,02	1,70	3,19	52,73	0,62	0
	5	4	2,02	1,70	3,16	52,73	0,59	0
2	0	6	3,02	2,55	4,01	52,72	1,44	0,01
	2	6	3,02	2,55	4,12	52,72	1,55	0,01
	5	6	3,02	2,55	4,17	52,72	1,6	0,01
3	0	8	4,03	3,41	4,98	52,71	2,41	0,02
	2	8	4,03	3,41	5,1	52,71	2,53	0,02
	5	8	4,03	3,41	5,15	52,71	2,58	0,02
4	0	10	5,04	4,26	6,03	52,65	3,46	0,08
	2	10	5,04	4,26	6,28	52,68	3,71	0,05
	5	10	5,04	4,26	6,39	52,65	3,82	0,08
5	0	12	6,05	5,11	7,35	52,62	4,78	0,11
	2	12	6,05	5,11	7,73	52,62	5,16	0,11
	5	12	6,05	5,11	7,8	52,62	5,23	0,11
6	0	14	7,06	5,96	9,5	52,25	6,93	0,48

	2	14	7,06	5,96	10,16	52,15	7,59	0,58
	5	14	7,06	5,96	10,54	52,09	7,97	0,64
7	0	16	8,06	6,81	11,58	52,02	9,01	0,71
	2	16	8,06	6,81	12,44	52,02	9,87	0,71
	5	16	8,06	6,81	12,6	52,02	10,03	0,71



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

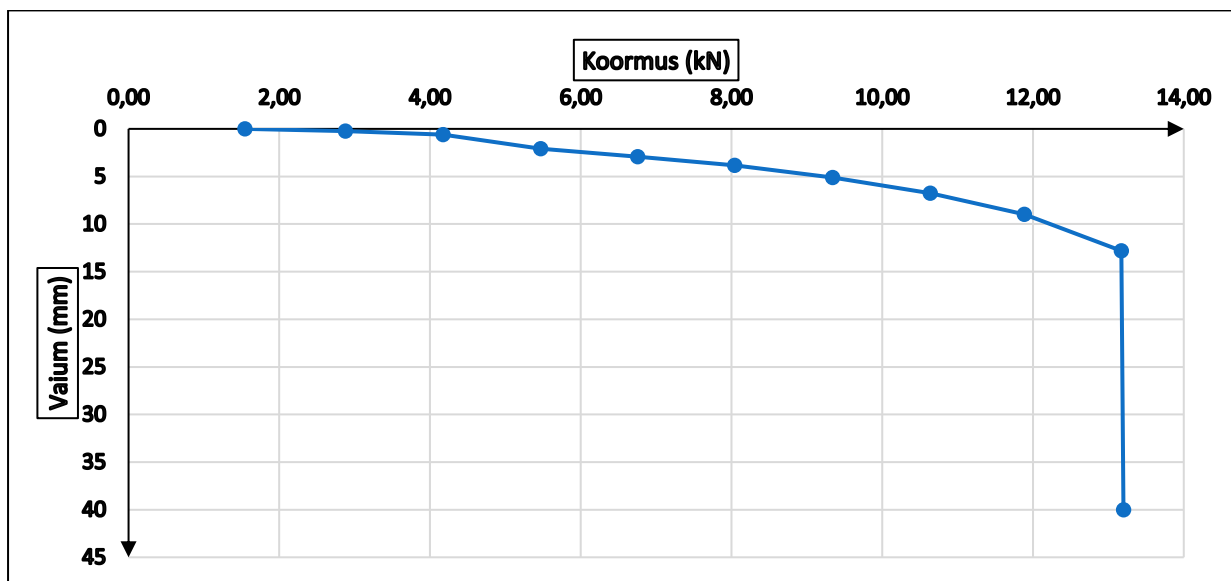
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	24,42	0
		2	24,42	0
		5	24,42	0
1	2,88	0	24,64	0,22
		2	24,64	0,22
		5	24,64	0,22
2	4,17	0	24,83	0,41
		2	25	0,58
		5	25,01	0,59
3	5,47	0	26,3	1,88
		2	26,49	2,07
		5	26,5	2,08
4	6,75	0	26,83	2,41
		2	27,32	2,9
		5	27,33	2,91
5	8,04	0	27,84	3,42
		2	28,21	3,79
		5	28,26	3,84
6	9,34	0	28,67	4,25
		2	29,45	5,03
		5	29,54	5,12
7	10,64	0	29,86	5,44
		2	31,07	6,65

		5	31,19	6,77
8	11,89	0	31,62	7,2
		2	33,17	8,75
		5	33,41	8,99
9	13,17	0	34,19	9,77
		2	36,58	12,16
		5	37,23	12,81
9	13,17	5	64,5	40,08



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

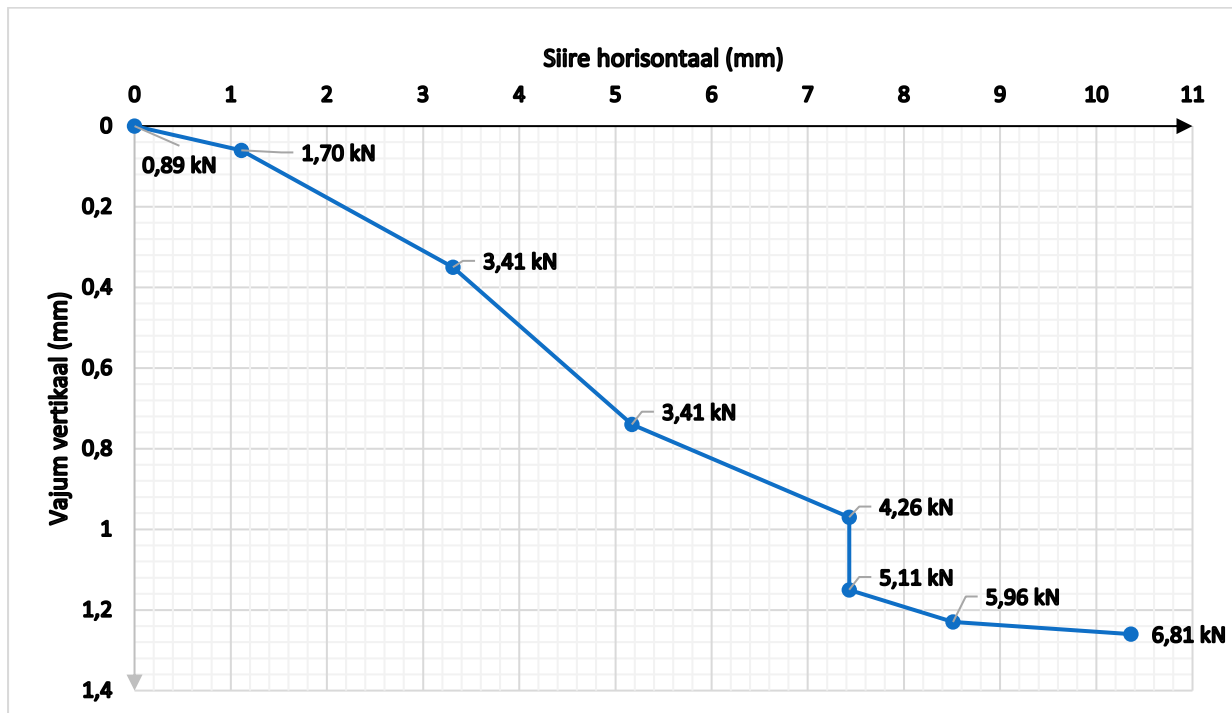
Vertikaalkoormus

2,88

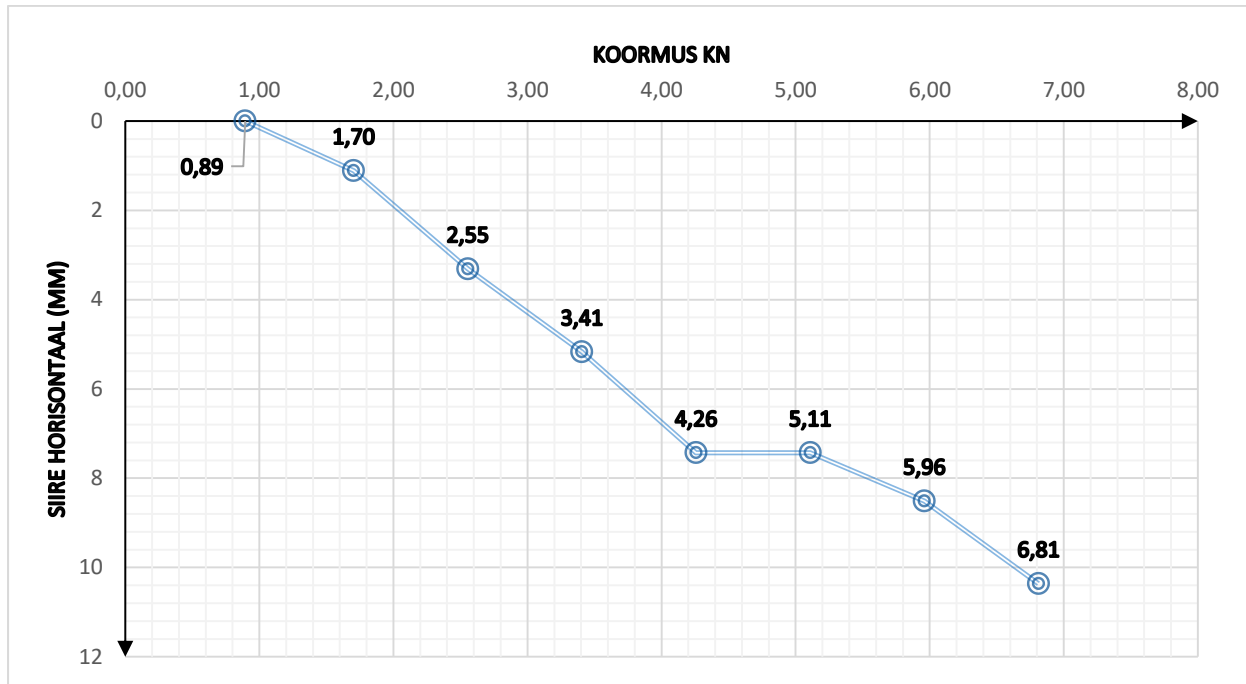
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,1	1,06	0,89	7,79	66,5	0	0
	2	2,1	1,06	0,89	7,79	66,5	0	0
	5	2,1	1,06	0,89	7,79	66,5	0	0
1	0	4	2,02	1,70	8,7	66,44	0,91	0,06
	2	4	2,02	1,70	8,87	66,44	1,08	0,06
	5	4	2,02	1,70	8,9	66,44	1,11	0,06
2	0	6	3,02	2,55	10,6	66,2	2,81	0,3
	2	6	3,02	2,55	11	66,15	3,21	0,35
	5	6	3,02	2,55	11,1	66,15	3,31	0,35
3	0	8	4,03	3,41	12,6	65,85	4,81	0,65
	2	8	4,03	3,41	12,87	65,89	5,08	0,61
	5	8	4,03	3,41	12,96	65,76	5,17	0,74
4	0	10	5,04	4,26	13,8	65,55	6,01	0,95
	2	10	5,04	4,26	14,14	65,53	6,35	0,97
	5	10	5,04	4,26	15,22	65,53	7,43	0,97

5	0	12	6,05	5,11	14,82	65,36	7,03	1,14
	2	12	6,05	5,11	15,17	65,35	7,38	1,15
	5	12	6,05	5,11	15,22	65,35	7,43	1,15
6	0	14	7,06	5,96	15,86	65,25	8,07	1,25
	2	14	7,06	5,96	16,22	65,25	8,43	1,25
	5	14	7,06	5,96	16,3	65,27	8,51	1,23
7	0	16	8,06	6,81	17,2	65,3	9,41	1,2
	2	16	8,06	6,81	18,02	65,45	10,23	1,05
	5	16	8,06	6,81	18,15	65,24	10,36	1,26



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

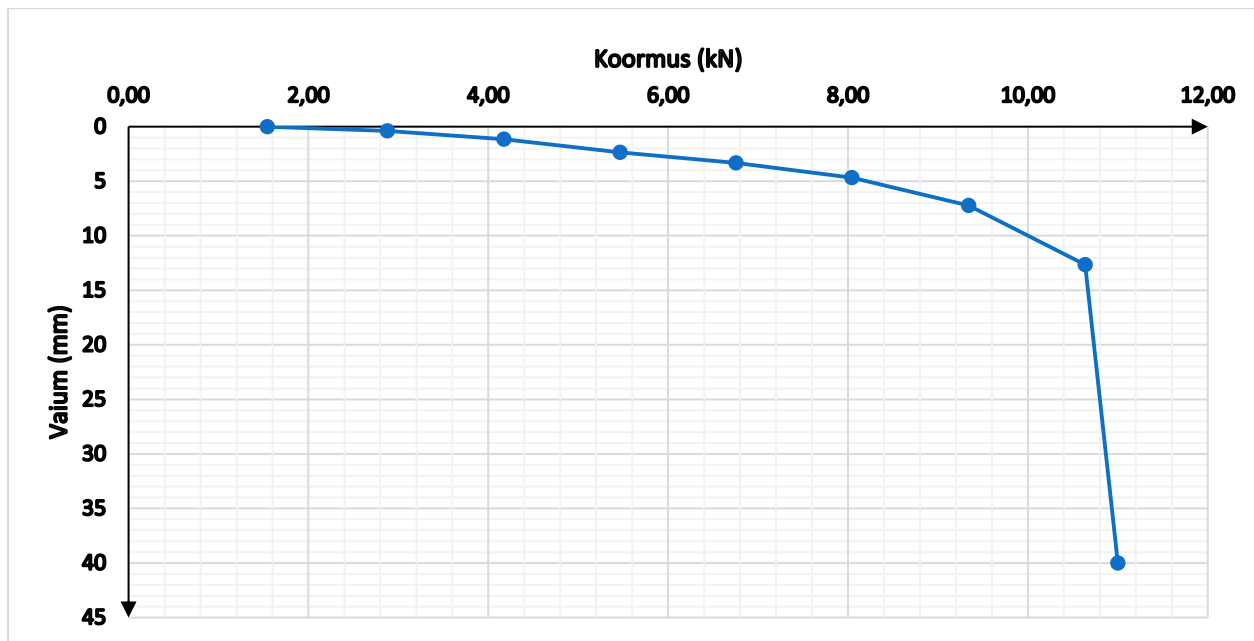
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatile koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatile katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	5,44	0
		2	5,44	0
		5	5,44	0
1	2,88	0	5,77	0,33
		2	5,81	0,37
		5	5,82	0,38
2	4,17	0	6,54	1,1
		2	6,58	1,14
		5	6,58	1,14
3	5,47	0	7,67	2,23
		2	7,78	2,34
		5	7,79	2,35
4	6,75	0	8,5	3,06
		2	8,75	3,31
		5	8,75	3,31
5	8,04	0	9,62	4,18
		2	10,08	4,64

		5	10,12	4,68
6	9,34	0	11,53	6,09
		2	12,53	7,09
		5	12,68	7,24
7	10,64	0	15,4	9,96
		2	17,57	12,13
		5	18,1	12,66
7	10,64	5	46	40,56



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

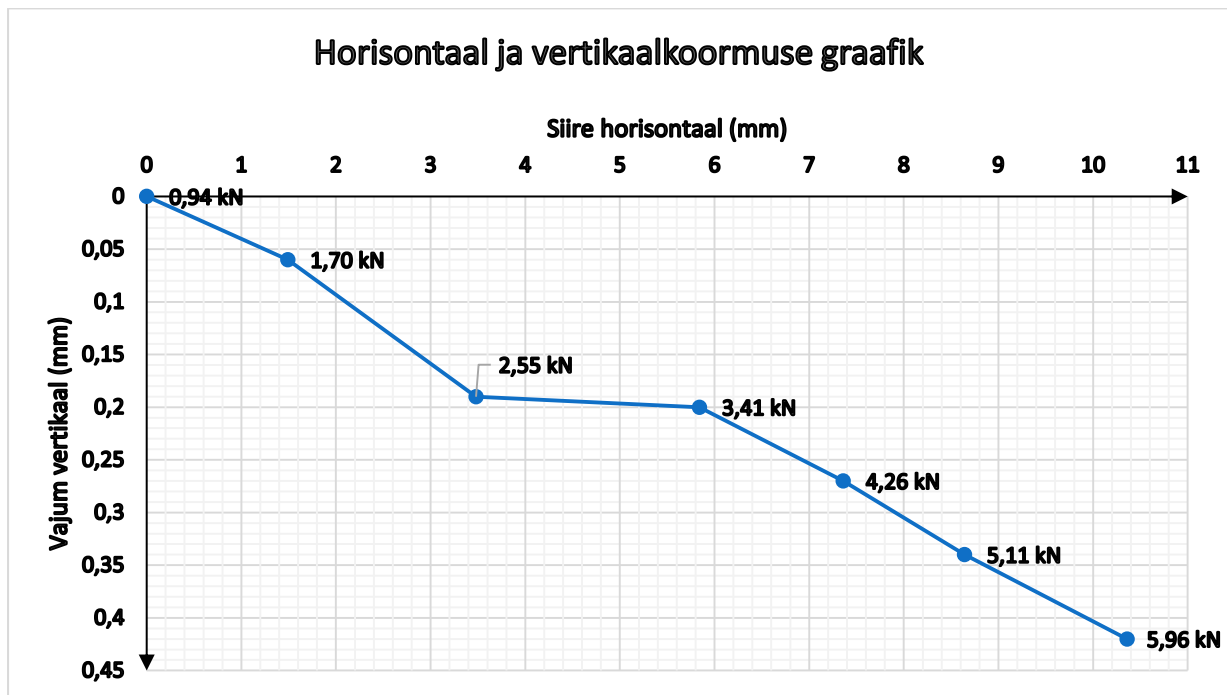
Vertikaalkoormus

4,17

kN

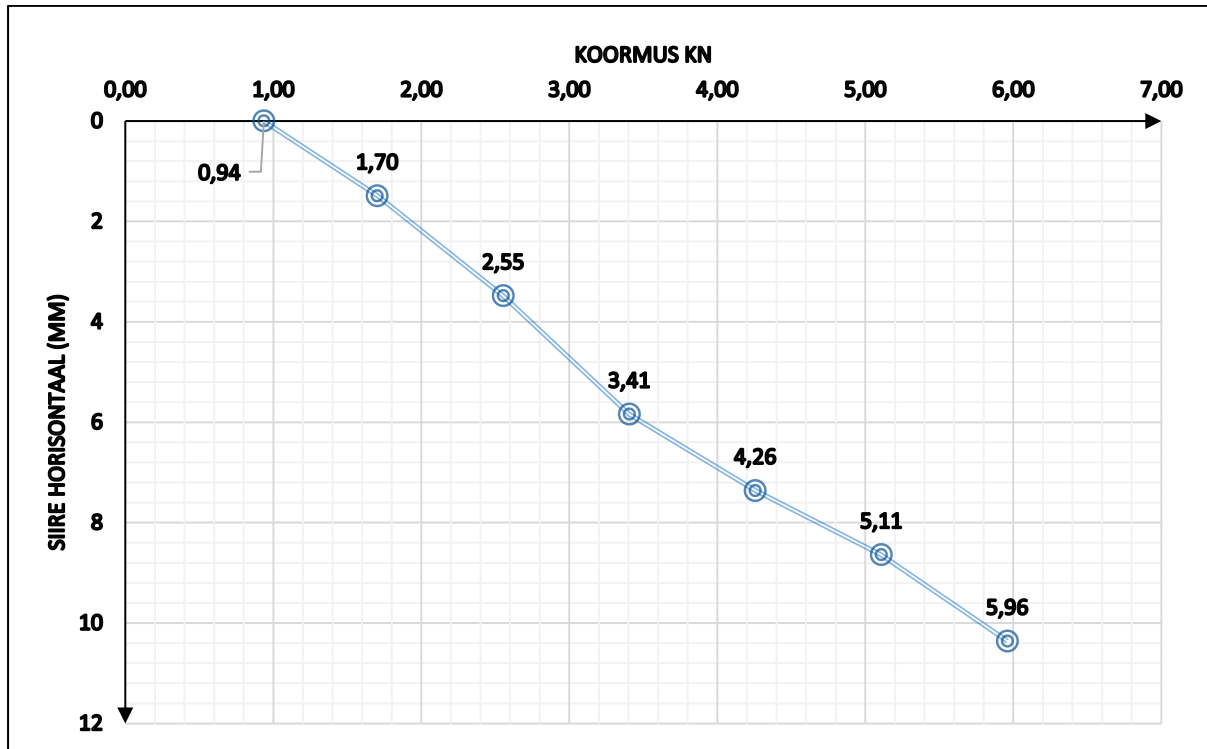
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,2	1,11	0,93	4,66	43,45	0	0
	2	2,2	1,11	0,93	4,66	43,45	0	0
	5	2,2	1,11	0,93	4,66	43,47	0	0,02
1	0	4	2,02	1,70	5,8	43,41	1,14	0,04
	2	4	2,02	1,70	6,1	43,39	1,44	0,06
	5	4	2,02	1,70	6,15	43,39	1,49	0,06
2	0	6	3,03	2,55	7,72	43,27	3,06	0,18
	2	6	3,03	2,55	8,04	43,26	3,38	0,19
	5	6	3,03	2,55	8,14	43,26	3,48	0,19
3	0	8	4,04	3,41	9,87	43,25	5,21	0,2
	2	8	4,04	3,41	10,26	43,25	5,6	0,2
	5	8	4,04	3,41	10,5	43,25	5,84	0,2
4	0	10	5,05	4,26	11,47	43,25	6,81	0,2

	2	10	5,05	4,26	11,97	43,18	7,31	0,27
	5	10	5,05	4,26	12,02	43,18	7,36	0,27
	0	12	6,06	5,11	13,07	43,11	8,41	0,34
5	2	12	6,06	5,11	13,25	43,11	8,59	0,34
	5	12	6,06	5,11	13,3	43,11	8,64	0,34
	0	14	7,07	5,96	14,5	43,03	9,84	0,42
6	2	14	7,07	5,96	14,99	43,03	10,33	0,42
	5	14	7,07	5,96	15,02	43,03	10,36	0,42



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

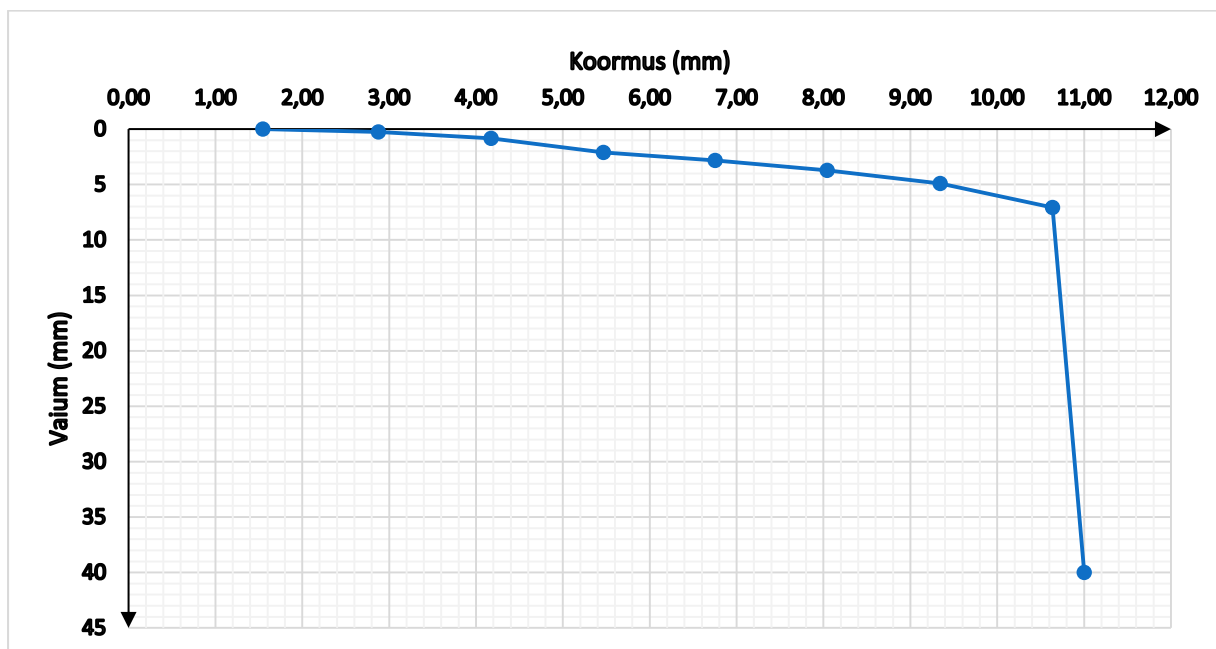
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	2	0,66
2	3	1,3	0,43
3	3	1,2	0,4

**2. Staatile koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatile katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	1,77	0
		2	1,77	0
		5	1,77	0
1	2,88	0	2,01	0,24
		2	2,02	0,25
		5	2,02	0,25
2	4,17	0	2,54	0,77
		2	2,6	0,83
		5	2,61	0,84
3	5,47	0	3,75	1,98
		2	3,87	2,1
		5	3,89	2,12
4	6,75	0	4,42	2,65
		2	4,56	2,79
		5	4,59	2,82
5	8,04	0	5,18	3,41
		2	5,46	3,69
		5	5,48	3,71
6	9,34	0	6,21	4,44
		2	6,58	4,81

		5	6,68	4,91
7	10,64	0	7,8	6,03
		2	8,67	6,9
		5	8,83	7,06
7	10,64	5	42	40,23



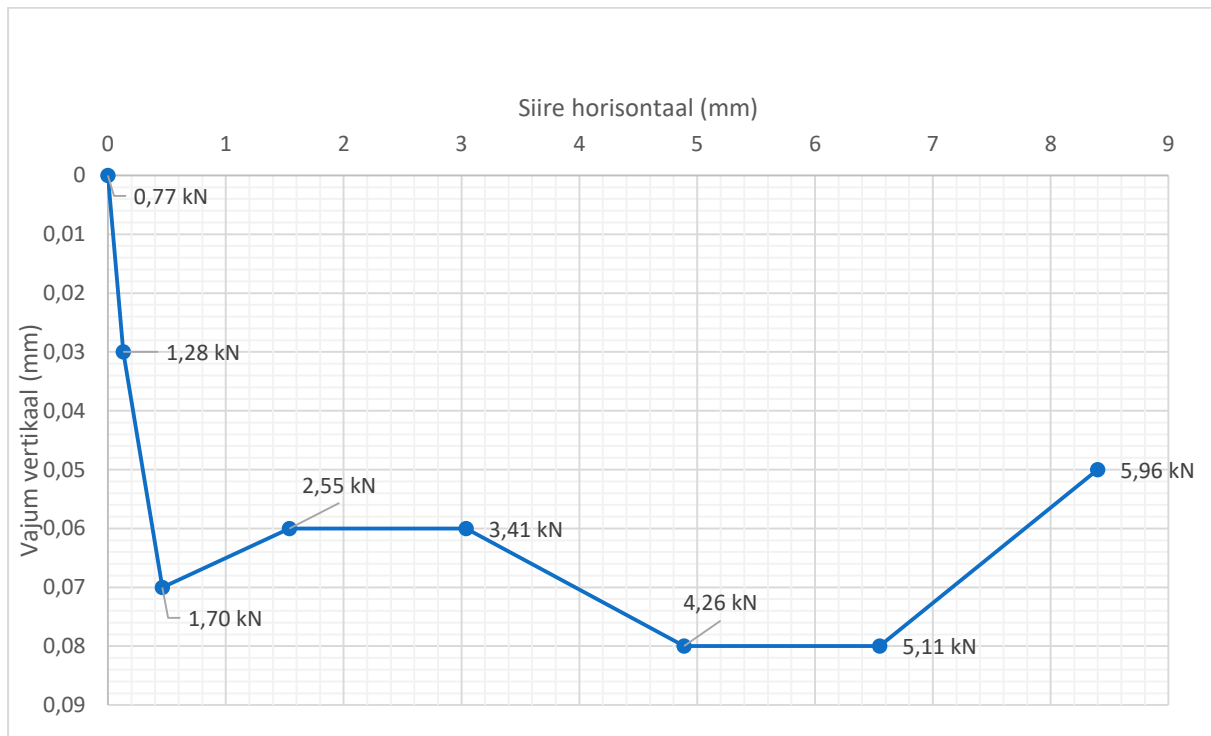
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 1. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

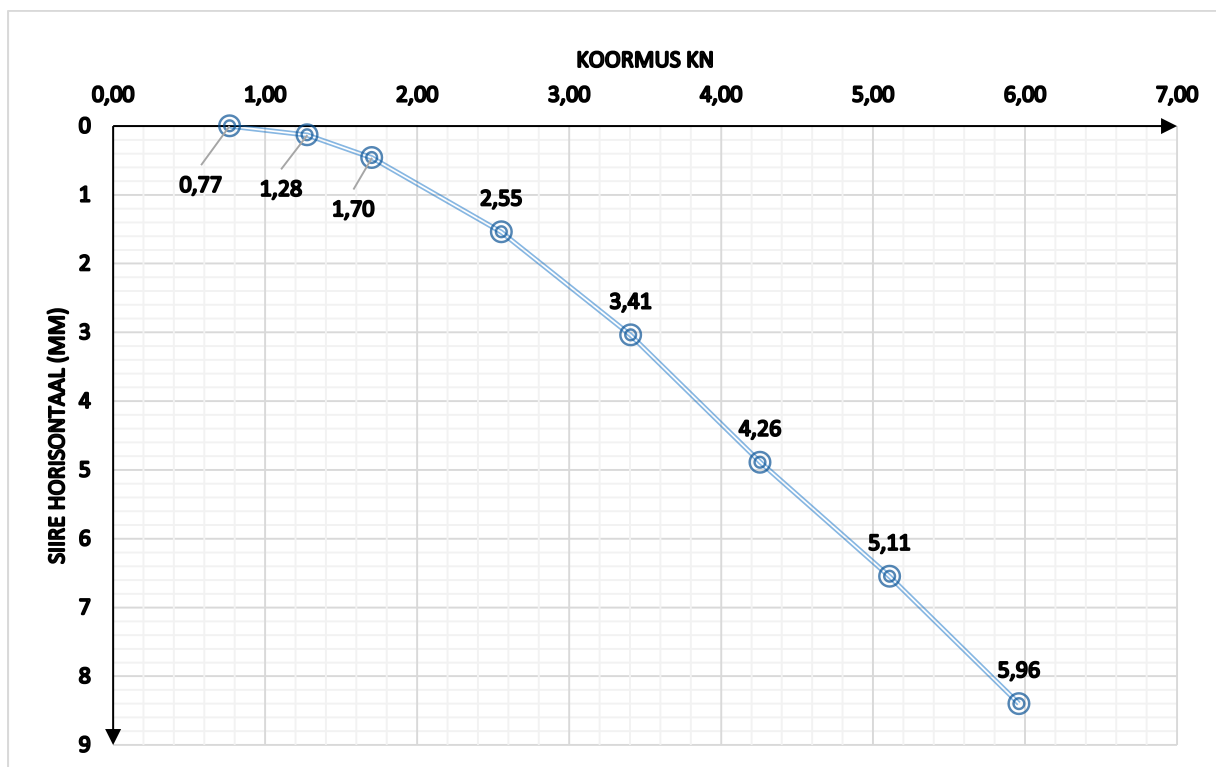
Vertikaalkoormus 4,17 kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,8	0,91	0,91	6,81	30,47	0	0
	2	1,8	0,91	0,91	6,81	30,47	0	0
	5	1,8	0,91	0,91	6,81	30,47	0	0
1	0	3	1,52	1,28	6,94	30,5	0,13	0,03
	2	3	1,52	1,28	6,94	30,5	0,13	0,03
	5	3	1,52	1,28	6,94	30,5	0,13	0,03
2	0	4	2,02	1,70	7,2	30,5	0,39	0,03
	2	4	2,02	1,70	7,26	30,52	0,45	0,05
	5	4	2,02	1,70	7,27	30,54	0,46	0,07
3	0	6	3,03	2,55	8,13	30,53	1,32	0,06
	2	6	3,03	2,55	8,32	30,53	1,51	0,06
	5	6	3,03	2,55	8,35	30,53	1,54	0,06
4	0	8	4,04	3,41	9,49	30,53	2,68	0,06
	2	8	4,04	3,41	9,79	30,53	2,98	0,06
	5	8	4,04	3,41	9,85	30,53	3,04	0,06
5	0	10	5,05	4,26	11,51	30,55	4,7	0,08

	2	10	5,05	4,26	11,67	30,55	4,86	0,08
	5	10	5,05	4,26	11,7	30,55	4,89	0,08
6	0	12	6,06	5,11	14,85	30,55	8,04	0,08
	2	12	6,06	5,11	13,36	30,55	6,55	0,08
	5	12	6,06	5,11	13,36	30,55	6,55	0,08
7	0	14	7,07	5,96	14,75	30,52	7,94	0,05
	2	14	7,07	5,96	15,01	30,52	8,2	0,05
	5	14	7,07	5,96	15,21	30,52	8,4	0,05



**Joonis 3.1** Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

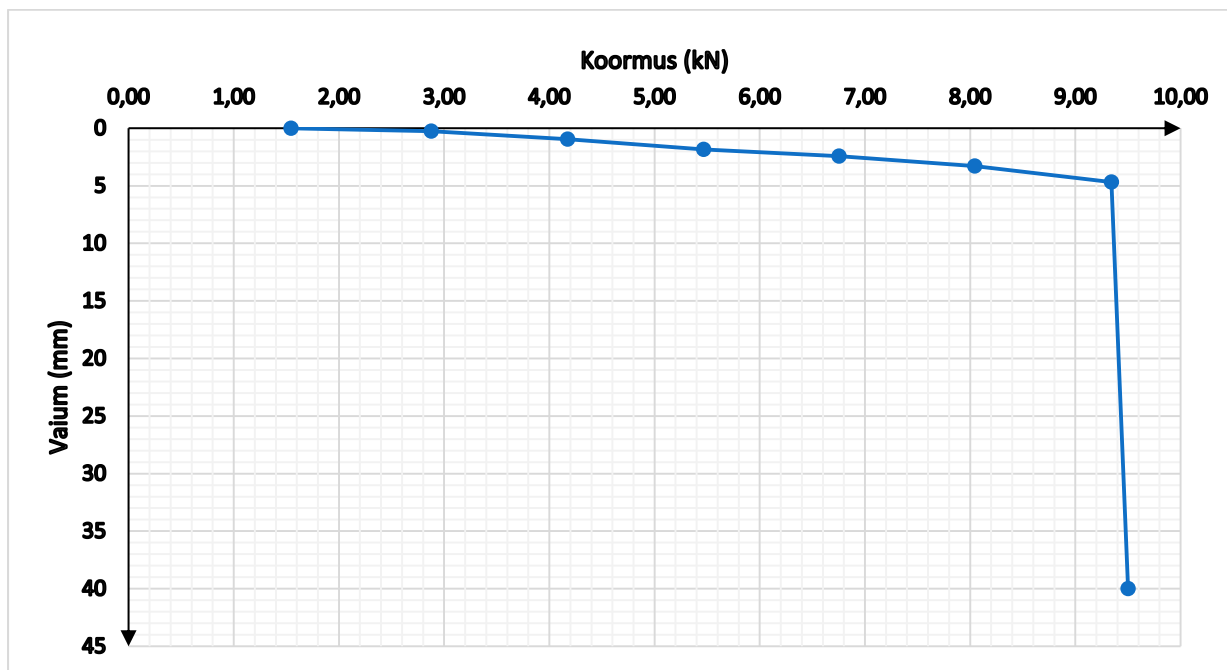
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	2	0,66
2	3	1,3	0,43
3	3	1,2	0,4

**2. Staatile koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatile katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	7,74	0
		2	7,74	0
		5	7,74	0
1	2,88	0	7,99	0,25
		2	8	0,26
		5	8,01	0,27
2	4,17	0	8,63	0,89
		2	8,67	0,93
		5	8,68	0,94
3	5,47	0	9,5	1,76
		2	9,58	1,84
		5	9,59	1,85
4	6,75	0	10,02	2,28
		2	10,15	2,41
		5	10,17	2,43
5	8,04	0	10,72	2,98
		2	10,98	3,24

		5	11,03	3,29
6	9,34	0	11,86	4,12
		2	12,32	4,58
		5	12,43	4,69
6	9,34	5	48	40,26



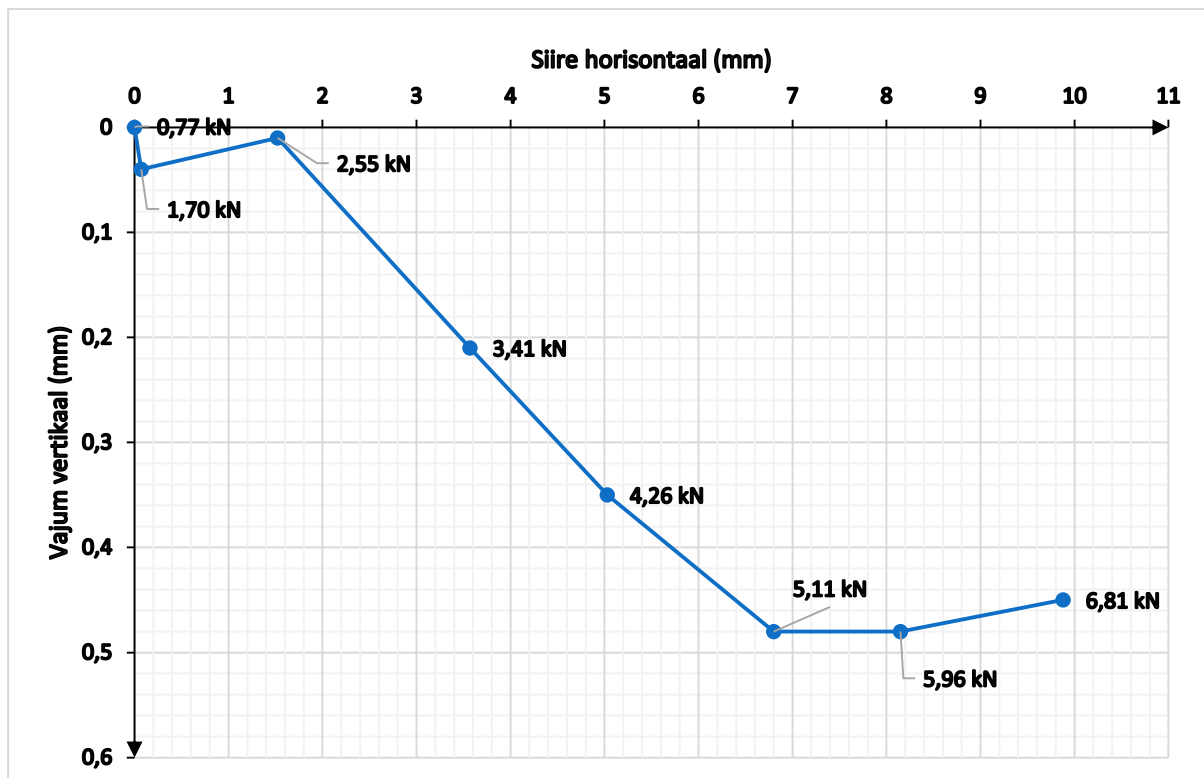
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 4,17 kN

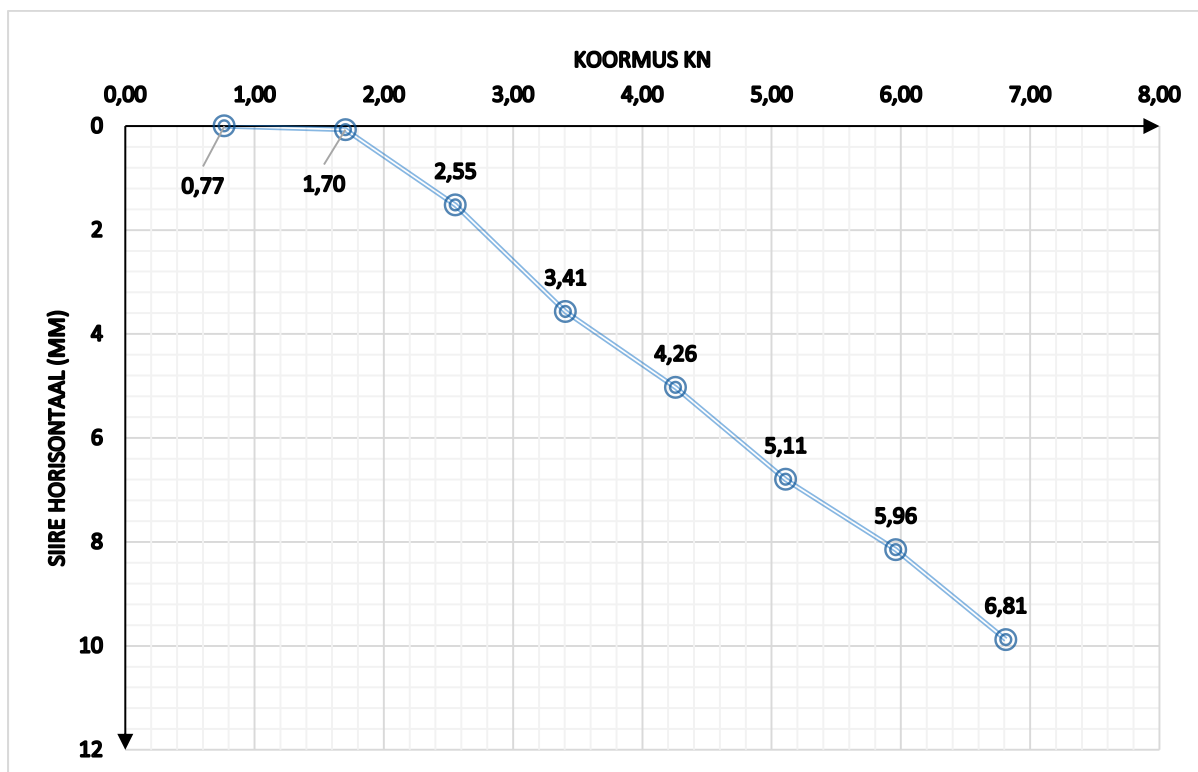
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,8	0,91	0,77	12,45	47,85	0	0
	2	1,8	0,91	0,77	12,45	47,85	0	0
	5	1,8	0,91	0,77	12,45	47,85	0	0
1	0	4	2,02	1,70	12,45	47,89	0	0,04
	2	4	2,02	1,70	12,51	47,89	0,06	0,04
	5	4	2,02	1,70	12,52	47,89	0,07	0,04
2	0	6	3,03	2,55	13,5	47,84	1,05	0,01
	2	6	3,03	2,55	13,89	47,84	1,44	0,01
	5	6	3,03	2,55	13,97	47,84	1,52	0,01
3	0	8	4,04	3,41	15,26	47,65	2,81	0,2
	2	8	4,04	3,41	15,81	47,64	3,36	0,21
	5	8	4,04	3,41	16,02	47,64	3,57	0,21
4	0	10	5,05	4,26	17,02	47,52	4,57	0,33
	2	10	5,05	4,26	17,34	47,52	4,89	0,33
	5	10	5,05	4,26	17,48	47,5	5,03	0,35

5	0	12	6,06	5,11	18,36	47,37	5,91	0,48
	2	12	6,06	5,11	19,02	47,37	6,57	0,48
	5	12	6,06	5,11	19,2	47,37	6,75	0,48
6	0	14	7,07	5,96	20,83	47,37	8,38	0,48
	2	14	7,07	5,96	20,45	47,37	8	0,48
	5	14	7,07	5,96	20,6	47,37	8,15	0,48
7	0	16	8,08	6,81	21,57	47,36	9,12	0,49
	2	16	8,08	6,81	22,27	47,37	9,82	0,48
	5	16	8,08	6,81	22,33	47,4	9,88	0,45



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

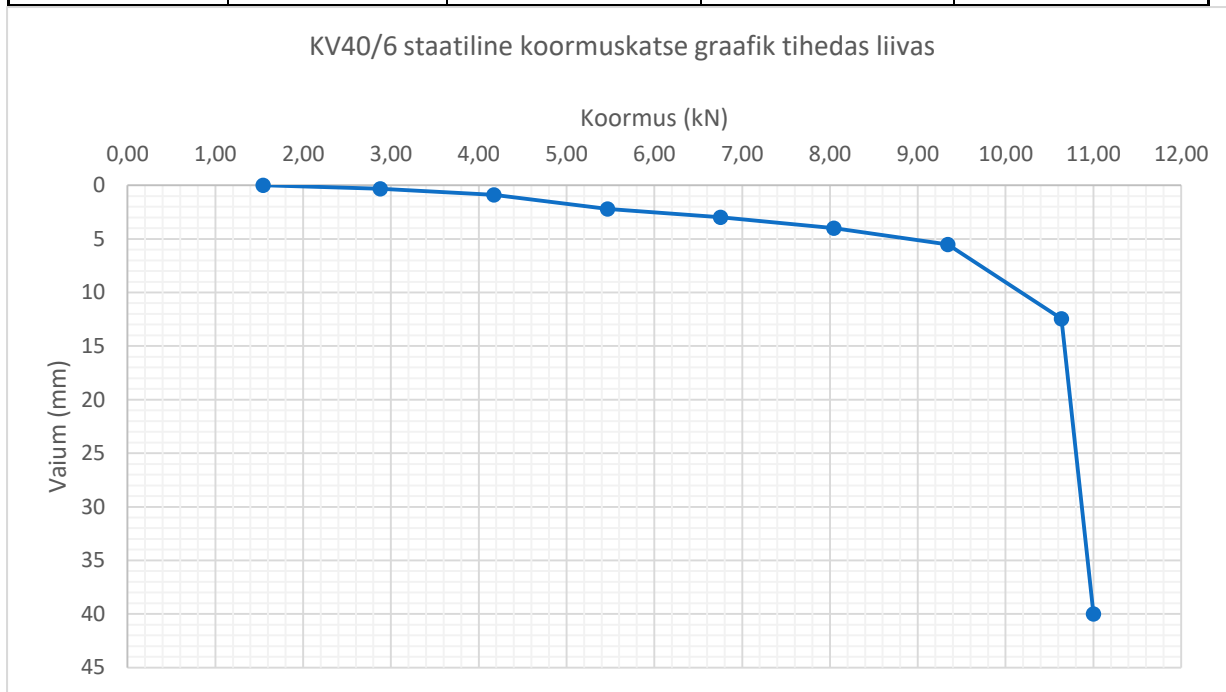
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,3	0,43
3	3	1,3	0,43

**2. Staatile koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatile katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	11,69	0
		2	11,69	0
		5	11,69	0
1	2,88	0	11,99	0,3
		2	12	0,31
		5	12,02	0,33
2	4,17	0	12,5	0,81
		2	12,57	0,88
		5	12,59	0,9
3	5,47	0	13,79	2,1
		2	13,88	2,19
		5	1389	1377,31
4	6,75	0	14,47	2,78
		2	14,62	2,93
		5	14,67	2,98
5	8,04	0	15,31	3,62
		2	15,64	3,95
		5	15,68	3,99
6	9,34	0	16,57	4,88

7	10,64	2	17,15	5,46
		5	17,21	5,52
		0	19,26	7,57
		2	24,13	12,44
		5	24,13	12,44
7	10,64	5	52	40,31



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 1. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

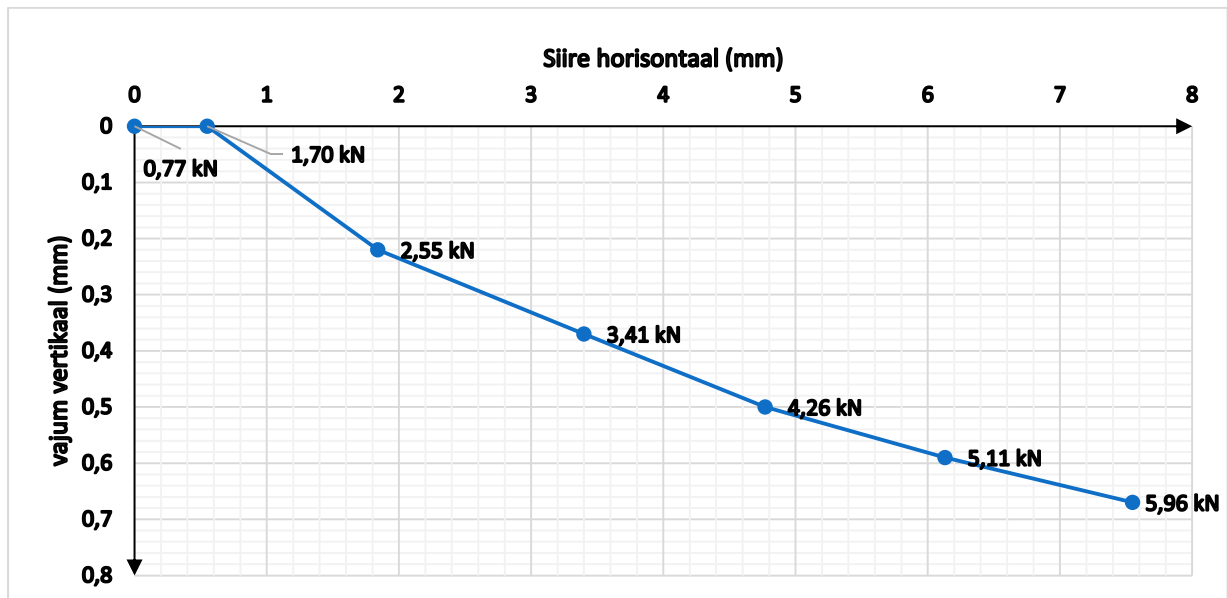
Vertikaalkoormus

5,47

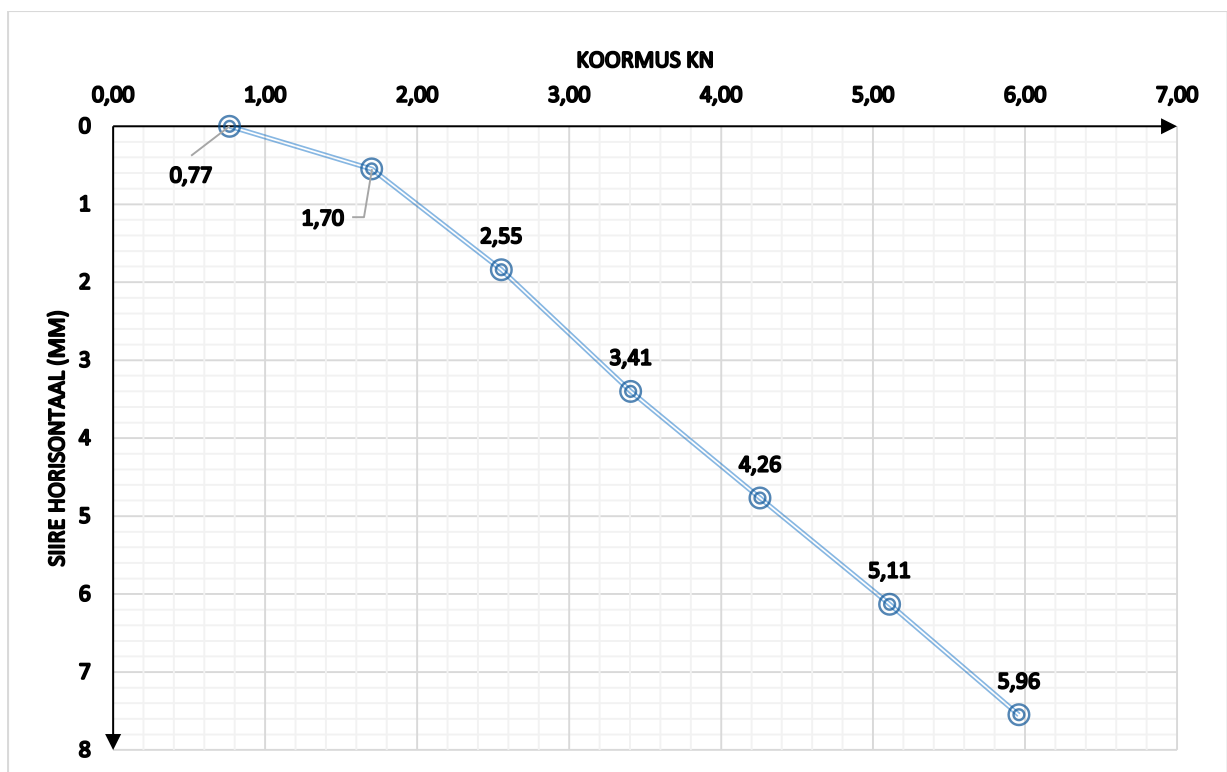
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	0,77	4,55	49,72	0	0
	2	2,4	1,21	0,77	4,55	49,74	0	0,02
	5	2,4	1,21	0,77	4,55	49,74	0	0,02
1	0	4	2,02	1,70	4,92	49,74	0,37	0,02
	2	4	2,02	1,70	5,08	49,74	0,53	0,02
	5	4	2,02	1,70	5,1	49,74	0,55	0,02
2	0	6	3,03	2,55	6,1	49,54	1,55	0,18
	2	6	3,03	2,55	6,3	49,53	1,75	0,19
	5	6	3,03	2,55	6,39	49,52	1,84	0,2
3	0	8	4,04	3,41	7,6	49,38	3,05	0,34
	2	8	4,04	3,41	7,95	49,37	3,4	0,35
	5	8	4,04	3,41	7,95	49,37	3,4	0,35
4	0	10	5,05	4,26	8,85	49,26	4,3	0,46
	2	10	5,05	4,26	9,31	49,24	4,76	0,48
	5	10	5,05	4,26	9,32	49,24	4,77	0,48

5	0	12	6,06	5,11	10,24	49,16	5,69	0,56
	2	12	6,06	5,11	10,67	49,15	6,12	0,57
	5	12	6,06	5,11	10,68	49,15	6,13	0,57
6	0	14	7,07	5,96	11,54	49,08	6,99	0,64
	2	14	7,07	5,96	12,02	49,08	7,47	0,64
	5	14	7,07	5,96	12,1	49,07	7,55	0,65



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

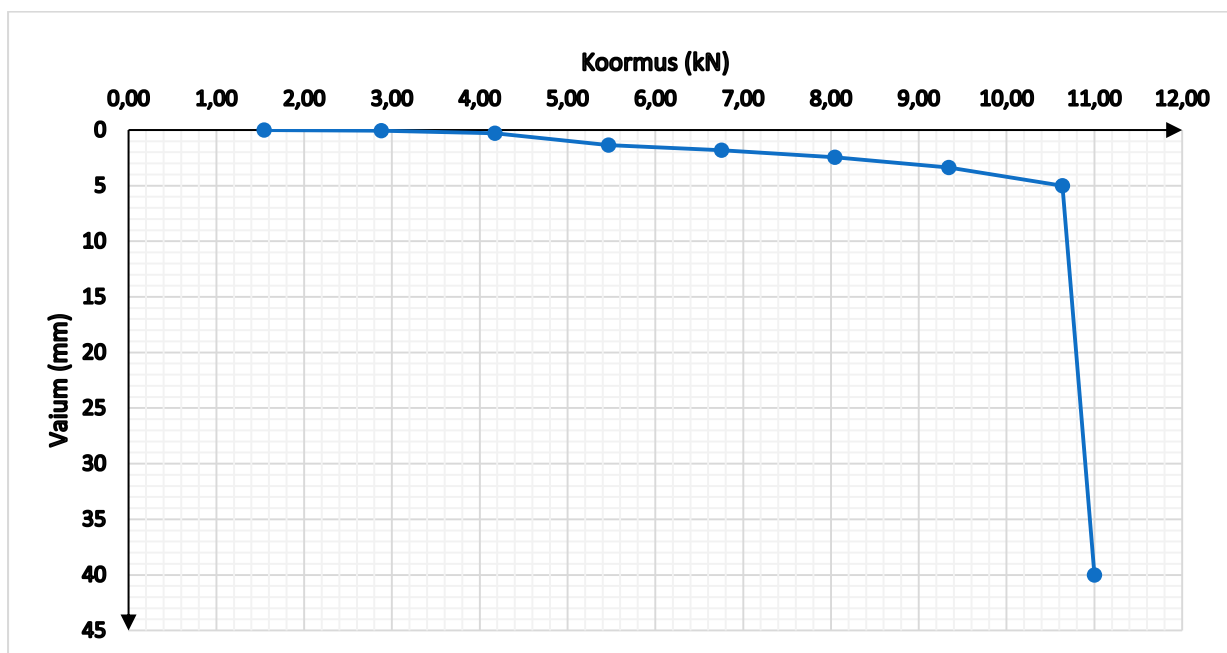
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	2	0,66
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	6,46	0
		2	6,46	0
		5	6,46	0
1	2,88	0	6,51	0,05
		2	6,51	0,05
		5	6,51	0,05
2	4,17	0	6,72	0,26
		2	6,76	0,3
		5	6,76	0,3
3	5,47	0	7,75	1,29
		2	7,81	1,35
		5	7,81	1,35
4	6,75	0	8,16	1,7
		2	8,27	1,81
		5	8,29	1,83
5	8,04	0	8,72	2,26
		2	8,8	2,34
		5	8,92	2,46
6	9,34	0	9,52	3,06
		2	9,8	3,34
		5	9,83	3,37
7	10,64	0	10,7	4,24

		2	11,32	4,86
		5	11,46	5
7	10,64	5	47	40,54



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 1. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

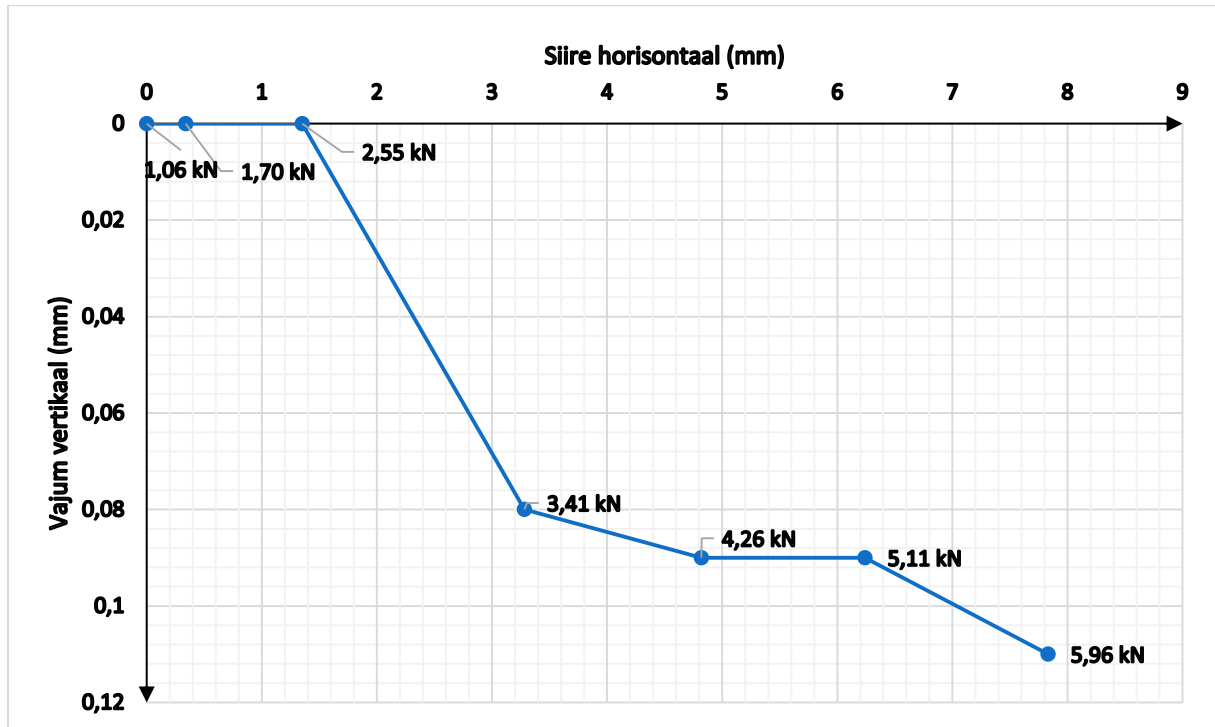
Vertikaalkoormus

5,47

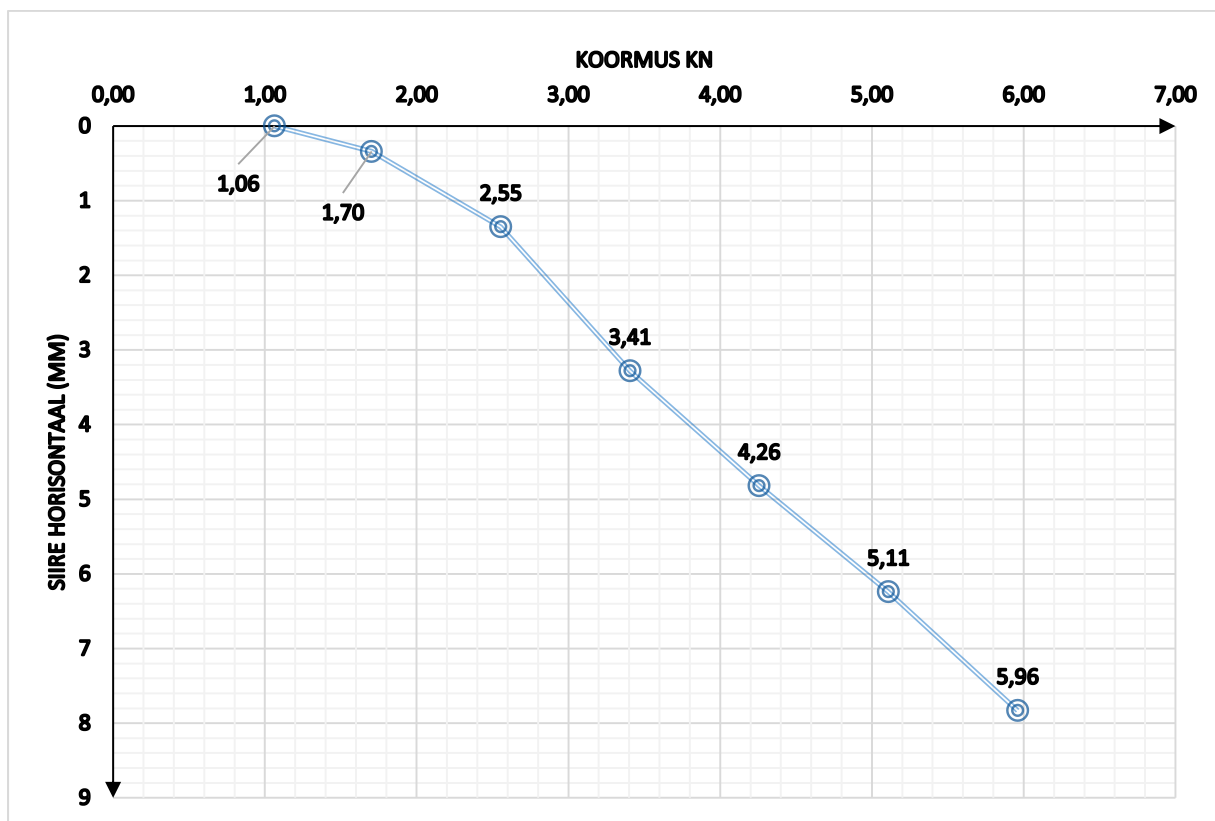
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,5	1,26	1,06	6,74	32,18	0	0
	2	2,5	1,26	1,06	6,74	32,18	0	0
	5	2,5	1,26	1,06	6,74	32,18	0	0
1	0	4	2,02	1,70	7,01	32,18	0,27	0
	2	4	2,02	1,70	7,08	32,18	0,34	0
	5	4	2,02	1,70	7,08	32,18	0,34	0
2	0	6	3,03	2,55	7,85	32,18	1,11	0
	2	6	3,03	2,55	8,02	32,18	1,28	0
	5	6	3,03	2,55	8,09	32,18	1,35	0
3	0	8	4,04	3,41	9,67	32,21	2,93	0,03
	2	8	4,04	3,41	9,94	32,25	3,2	0,07
	5	8	4,04	3,41	10,02	32,26	3,28	0,08
4	0	10	5,05	4,26	11,15	32,18	4,41	0
	2	10	5,05	4,26	11,55	32,17	4,81	0,01
	5	10	5,05	4,26	11,56	32,27	4,82	0,09
5	0	12	6,06	5,11	12,56	32,1	5,82	0,08
	2	12	6,06	5,11	12,88	32,09	6,14	0,09

	5	12	6,06	5,11	12,98	32,27	6,24	0,09
6	0	14	7,07	5,96	14,1	32,08	7,36	0,1
	2	14	7,07	5,96	14,51	32,08	7,77	0,1
	5	14	7,07	5,96	14,57	32,29	7,83	0,11



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik



Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

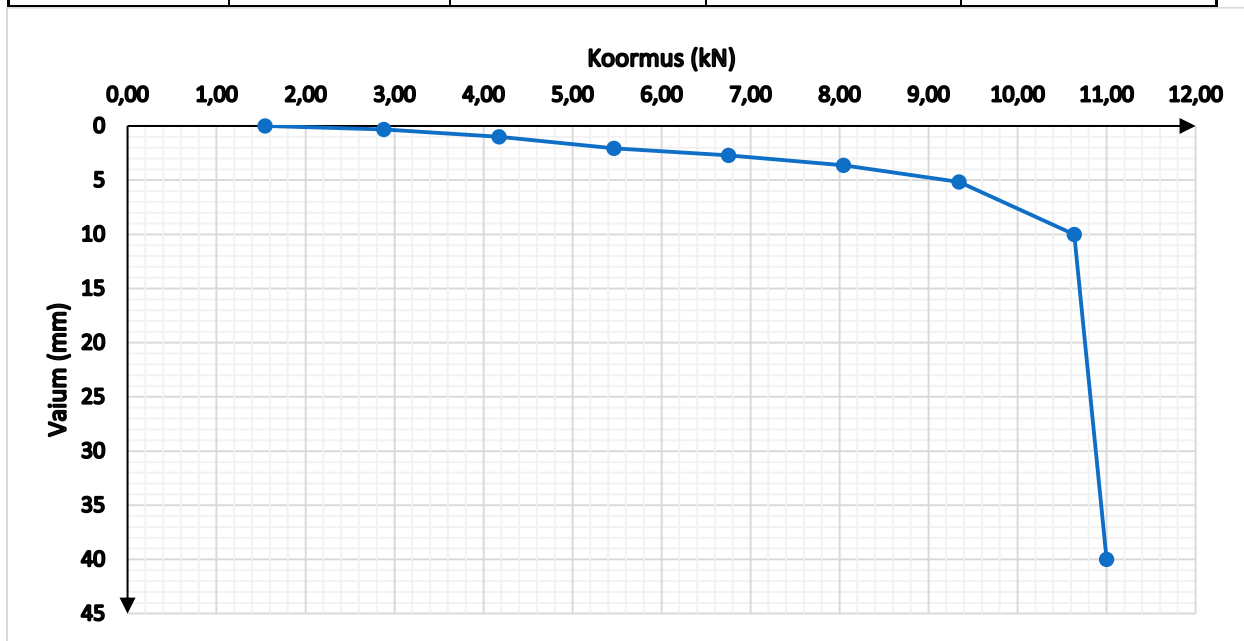
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,6	0,53
2	3	1,3	0,43
3	3	1,3	0,43

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	3,4	0
		2	3,4	0
		5	3,4	0
1	2,88	0	3,72	0,32
		2	3,73	0,33
		5	3,73	0,33
2	4,17	0	4,33	0,93
		2	4,38	0,98
		5	4,4	1
3	5,47	0	5,32	1,92
		2	5,42	2,02
		5	5,45	2,05
4	6,75	0	5,9	2,5
		2	6,06	2,66
		5	6,1	2,7
5	8,04	0	6,7	3,3
		2	6,97	3,57
		5	7,02	3,62

6	9,34	0	8,04	4,64
		2	8,41	5,01
		5	8,57	5,17
7	10,64	0	9,5	6,1
		2	9,52	6,12
		5	9,75	6,35
7	10,64	5	44	40,6



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 1. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

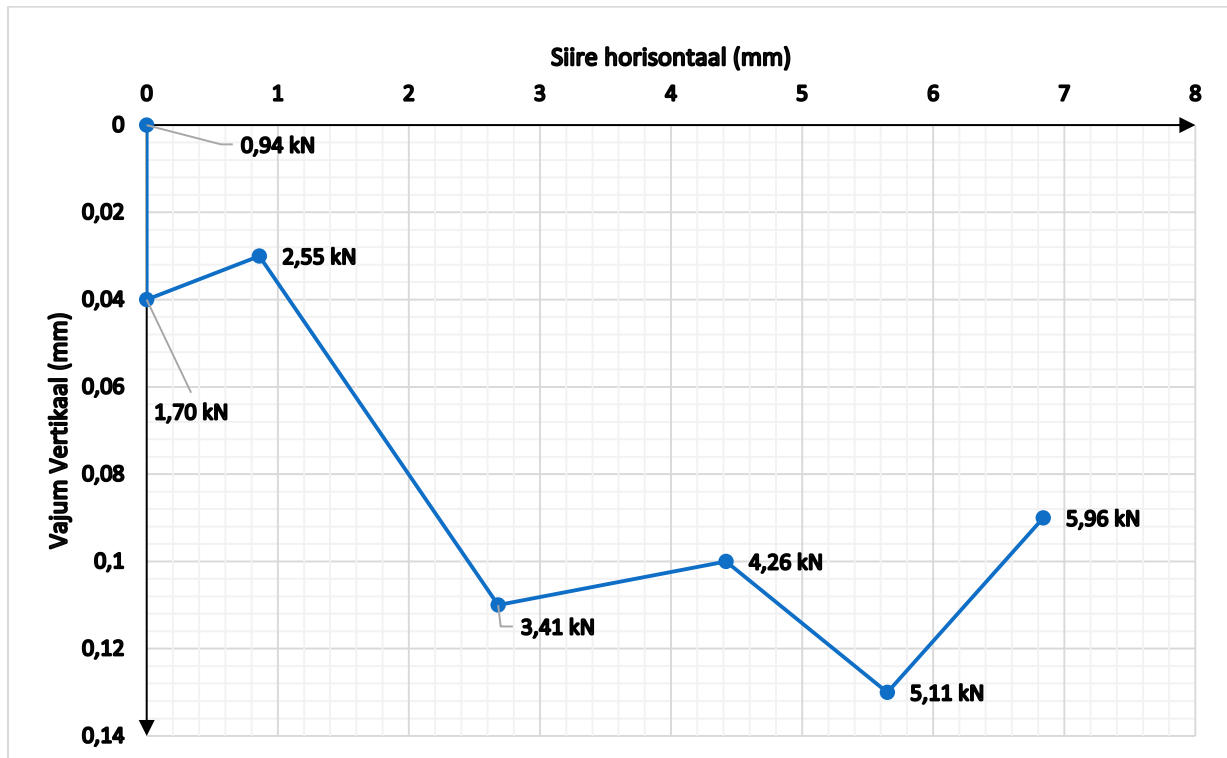
Vertikaalkoormus

5,47

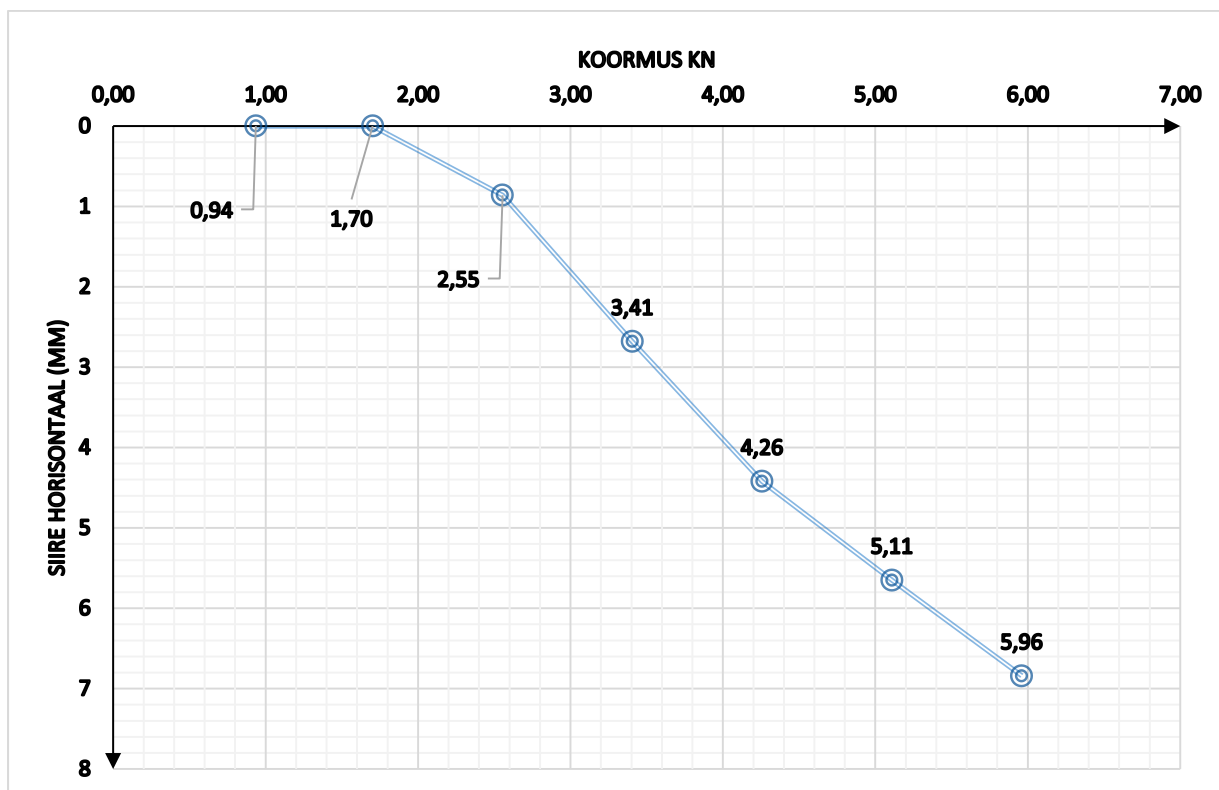
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,2	1,11	0,94	9,62	34,92	0	0
	2	2,2	1,11	0,94	9,62	34,92	0	0
	5	2,2	1,11	0,94	9,62	34,92	0	0
1	0	4	2,02	1,70	9,62	34,94	0	0,02
	2	4	2,02	1,70	9,62	34,94	0	0,02
	5	4	2,02	1,70	9,62	34,96	0	0,04
2	0	6	3,03	2,55	10,11	34,89	0,49	0,03
	2	6	3,03	2,55	10,48	34,89	0,86	0,03
	5	6	3,03	2,55	10,48	34,89	0,86	0,03
3	0	8	4,04	3,41	12,07	34,81	2,45	0,11
	2	8	4,04	3,41	12,2	34,81	2,58	0,11
	5	8	4,04	3,41	12,3	34,81	2,68	0,11
4	0	10	5,05	4,26	13,52	34,92	3,9	0
	2	10	5,05	4,26	13,8	34,82	4,18	0,1
	5	10	5,05	4,26	14,04	34,82	4,42	0,1

5	0	12	6,06	5,11	14,8	34,79	5,18	0,13
	2	12	6,06	5,11	15,19	34,79	5,57	0,13
	5	12	6,06	5,11	15,27	34,79	5,65	0,13
6	0	14	7,07	5,96	15,92	34,76	6,3	0,16
	2	14	7,07	5,96	16,4	34,81	6,78	0,11
	5	14	7,07	5,96	16,46	34,83	6,84	0,09
7	0	16	8,08	6,81	18,1	36,05	8,48	1,13
	2							
	5							



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused: Pinnas on veega küllastunud

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

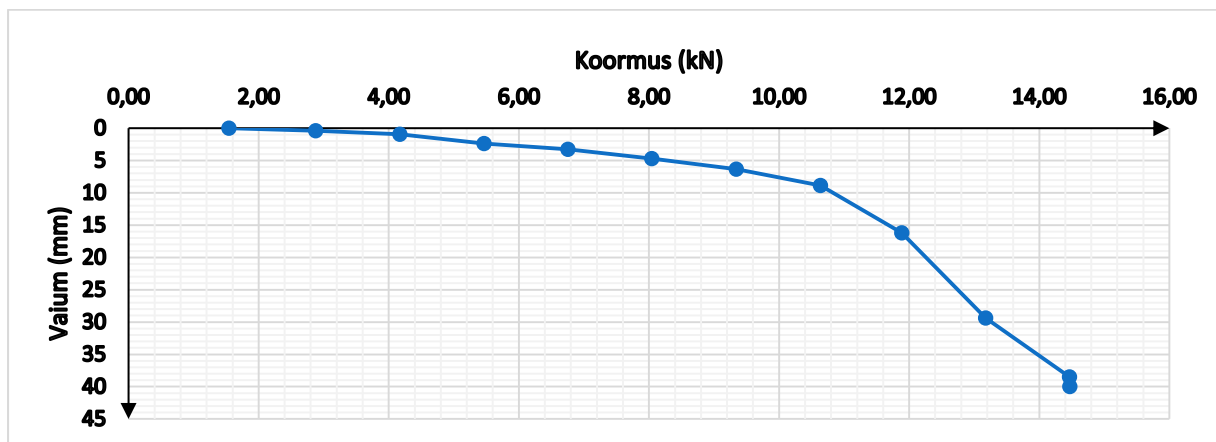
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,6	0,53
2	3	1,3	0,43
3	3	1,3	0,43

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	4,7	0
		2	4,7	0
		5	4,7	0
1	2,88	0	5,07	0,37
		2	5,08	0,38
		5	5,08	0,38
2	4,17	0	5,59	0,89
		2	5,64	0,94
		5	5,64	0,94
3	5,47	0	6,94	2,24
		2	6,96	2,26
		5	7,09	2,39
4	6,75	0	7,73	3,03
		2	7,96	3,26
		5	7,97	3,27
5	8,04	0	8,92	4,22
		2	9,32	4,62
		5	9,4	4,7
6	9,34	0	10,9	6,2
		2	11	6,3
		5	11,03	6,33
7	10,64	0	12,05	7,35
		2	13,21	8,51
		5	13,57	8,87
8	11,89	0	16,9	12,2
		2	18,90	14,2
		5	20,90	16,2
9	13,17	0	31,70	27

		2	32,72	28,02
		5	34,10	29,4
10	14,46	0	35,40	30,7
		2	40,15	35,45
		5	43,20	38,5
10	14,46	5	45	40,3



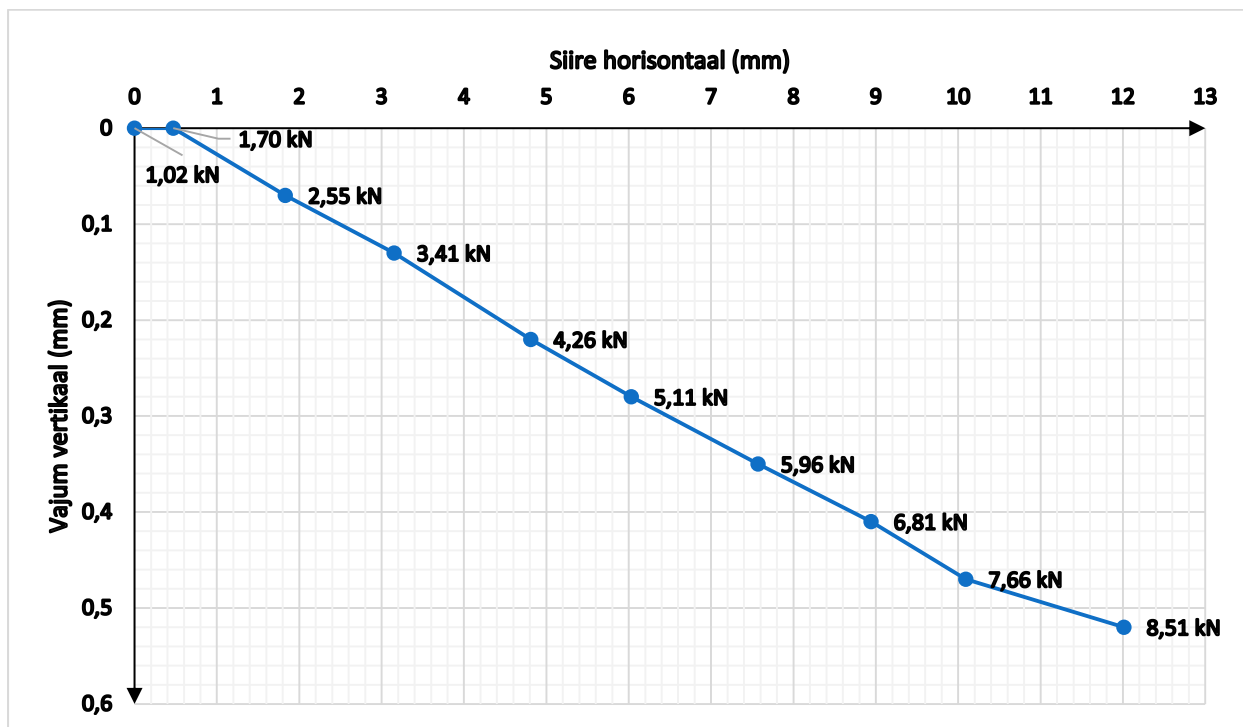
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

### 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

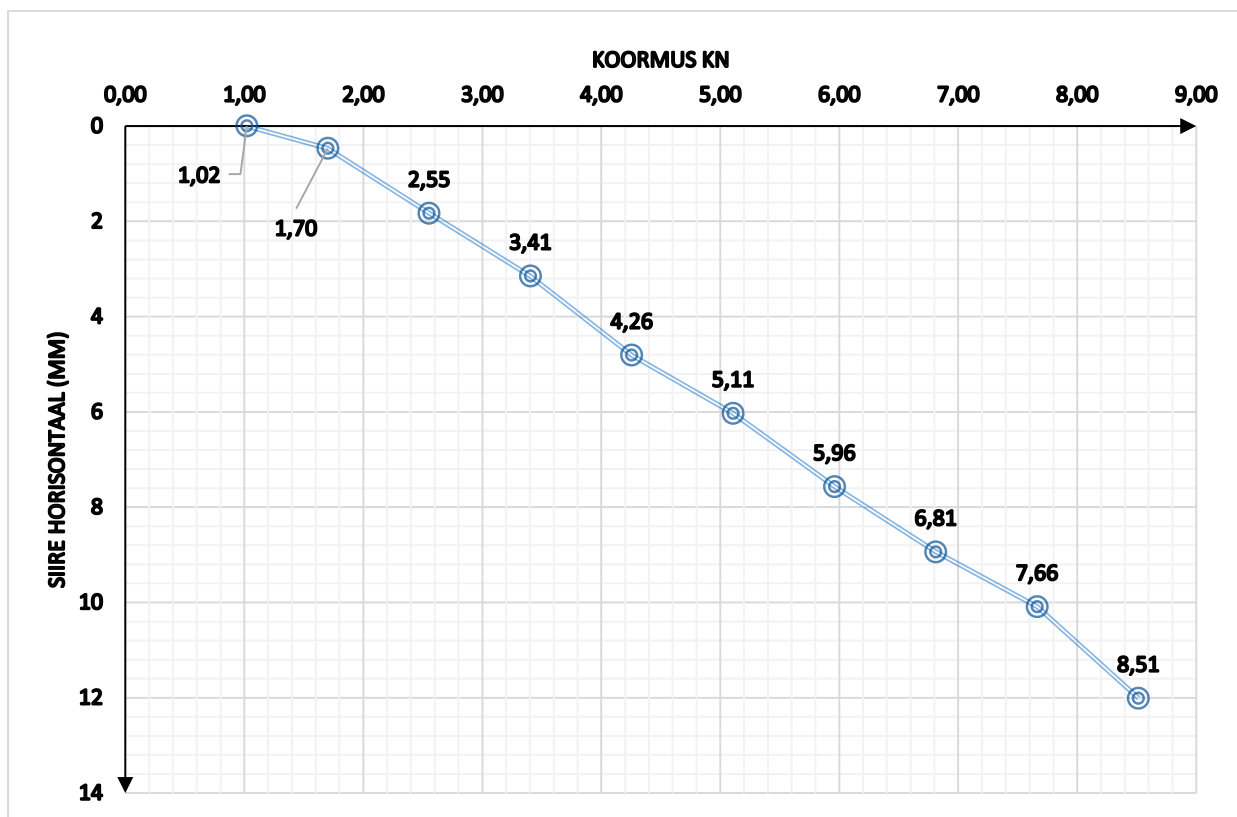
Vertikaalkoormus 6,75 kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	0,11	48,14	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	0,11	48,14	0	0
	5	2,4	1,21	1,02	0,11	48,14	0	0
1	0	4	2,02	1,70	0,41	48,14	0,3	0
	2	4	2,02	1,70	0,58	48,14	0,47	0
	5	4	2,02	1,70	0,58	48,14	0,47	0
2	0	6	3,03	2,55	1,5	48,07	1,39	0,07
	2	6	3,03	2,55	1,9	48,07	1,79	0,07
	5	6	3,03	2,55	1,94	48,07	1,83	0,07
3	0	8	4,04	3,41	2,85	48,01	2,74	0,13
	2	8	4,04	3,41	3,19	48,01	3,08	0,13
	5	8	4,04	3,41	3,26	48,01	3,15	0,13
4	0	10	5,05	4,26	4,29	47,93	4,18	0,21
	2	10	5,05	4,26	4,88	47,92	4,77	0,22
	5	10	5,05	4,26	4,92	47,92	4,81	0,22
5	0	12	6,06	5,11	5,58	47,86	5,47	0,28
	2	12	6,06	5,11	6,13	47,86	6,02	0,28
	5	12	6,06	5,11	6,14	47,86	6,03	0,28
6	0	14	7,07	5,96	7,1	47,79	6,99	0,35
	2	14	7,07	5,96	7,64	47,79	7,53	0,35
	5	14	7,07	5,96	7,68	47,79	7,57	0,35
7	0	16	8,08	6,81	8,4	47,74	8,29	0,4

	2	16	8,08	6,81	8,9	47,74	8,79	0,4
	5	16	8,08	6,81	9,05	47,3	8,94	0,84
8	0	18	9,09	7,66	9,66	47,67	9,55	0,47
	2	18	9,09	7,66	10,94	47,67	10,83	0,47
	5	18	9,09	7,66	10,2	47,67	10,09	0,47
9	0	20	10,10	8,51	11,07	47,65	10,96	0,49
	2	20	10,10	8,51	11,88	47,65	11,77	0,49
	5	20	10,10	8,51	12,12	47,62	12,01	0,52



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik



Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

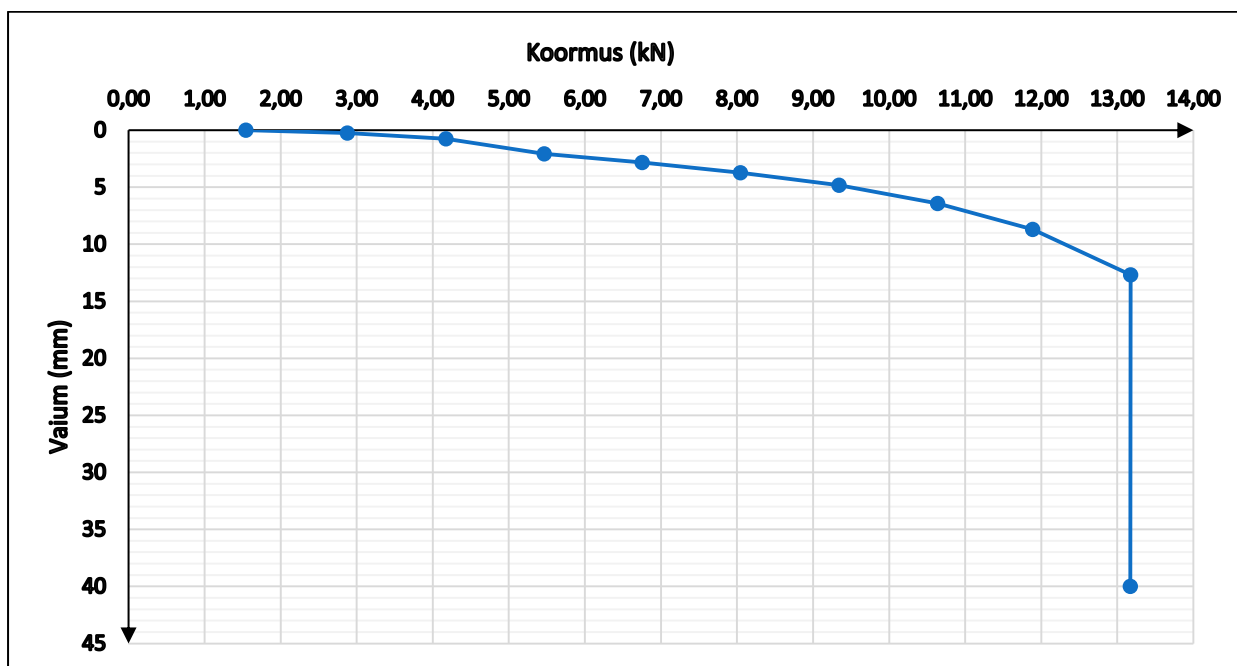
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,3	0,43
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatileise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	13,28	0
		2	13,28	0
		5	13,28	0
1	2,88	0	13,5	0,22
		2	13,52	0,24
		5	13,53	0,25
2	4,17	0	13,9	0,62
		2	13,98	0,7
		5	14,02	0,74
3	5,47	0	15,2	1,92
		2	15,34	2,06
		5	15,35	2,07
4	6,75	0	15,9	2,62
		2	16,06	2,78
		5	16,1	2,82
5	8,04	0	16,62	3,34
		2	16,94	3,66
		5	17,01	3,73
6	9,34	0	17,6	4,32
		2	17,97	4,69
		5	18,1	4,82
7	10,64	0	19,1	5,82
		2	19,63	6,35

		5	19,7	6,42
8	11,89	0	20,15	6,87
		2	21,45	8,17
		5	21,97	8,69
9	13,17	0	23,45	10,17
		2	25,46	12,18
		5	25,97	12,69
9	13,17	5	54,00	40,72



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

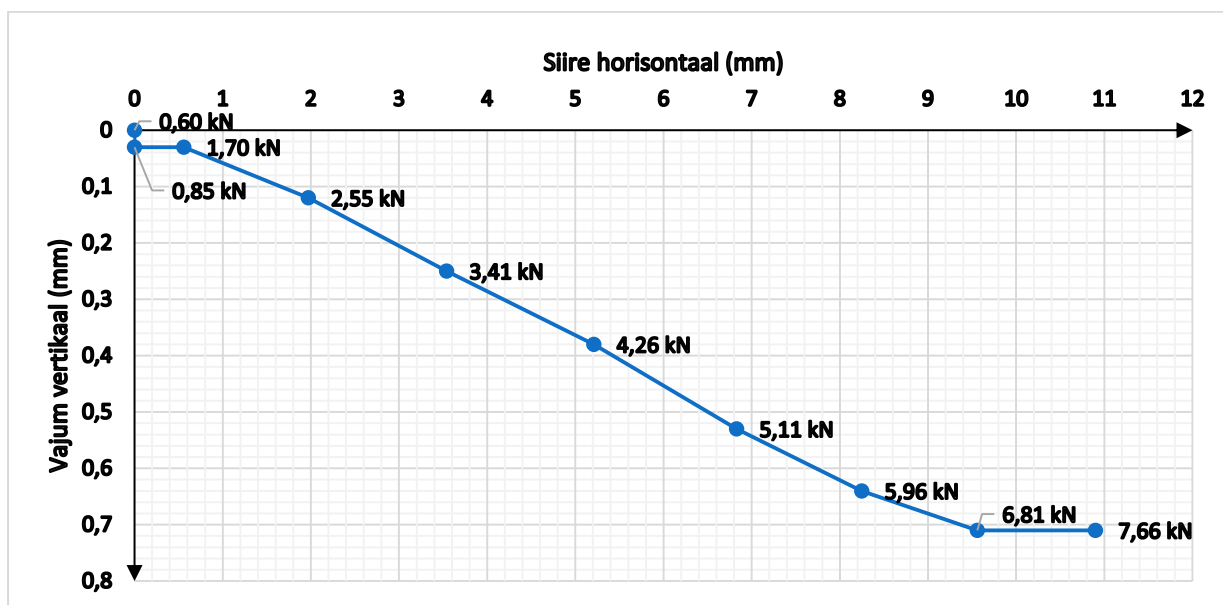
Vertikaalkoormus

6,75

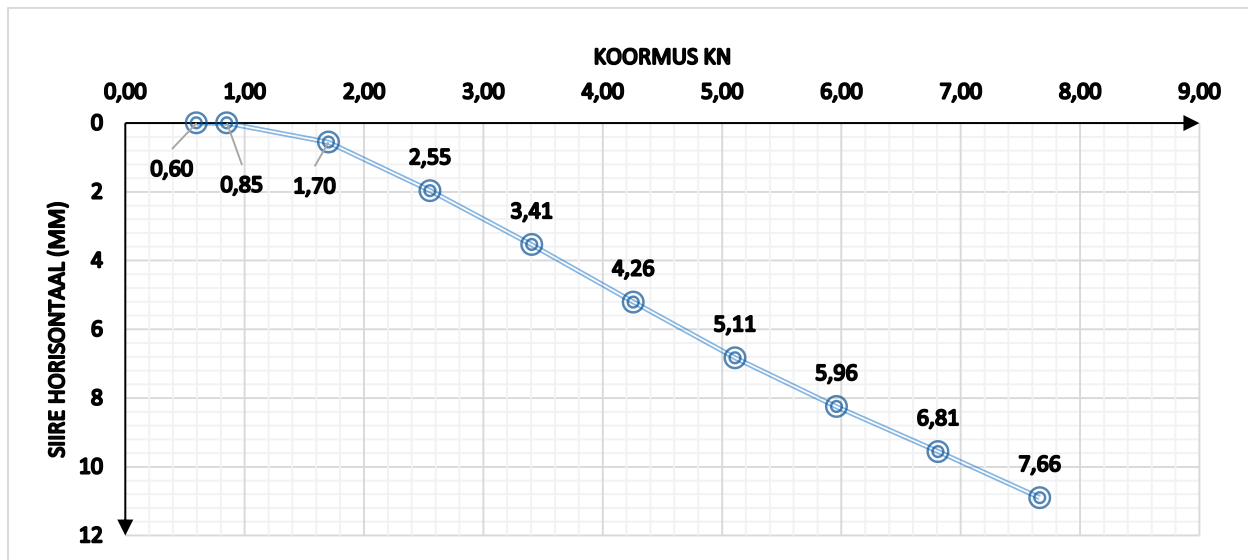
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,4	0,71	0,59	3,14	48,7	0	0
	2	1,4	0,71	0,59	3,14	48,7	0	0
	5	1,4	0,71	0,59	3,14	48,7	0	0
1	0	2	1,01	0,85	3,14	48,73	0	0,03
	2	2	1,01	0,85	3,14	48,73	0	0,03
	5	2	1,01	0,85	3,14	48,73	0	0,03
2	0	4	2,02	1,70	3,36	48,72	0,22	0,02
	2	4	2,02	1,70	3,69	48,73	0,55	0,03
	5	4	2,02	1,70	3,7	48,73	0,56	0,03
3	0	6	3,03	2,55	4,87	48,58	1,73	0,12
	2	6	3,03	2,55	5,11	48,58	1,97	0,12
	5	6	3,03	2,55	5,11	48,58	1,97	0,12

4	0	8	4,04	3,40	6,3	48,45	3,16	0,25
	2	8	4,04	3,40	6,66	48,45	3,52	0,25
	5	8	4,04	3,40	6,68	48,45	3,54	0,25
5	0	10	5,05	4,26	7,8	48,32	4,66	0,38
	2	10	5,05	4,26	8,29	48,32	5,15	0,38
	5	10	5,05	4,26	8,35	48,32	5,21	0,38
6	0	12	6,06	5,10	9,4	48,19	6,26	0,51
	2	12	6,06	5,10	9,88	48,17	6,74	0,53
	5	12	6,06	5,10	9,97	48,17	6,83	0,53
7	0	14	7,07	5,96	10,9	48,07	7,76	0,63
	2	14	7,07	5,96	11,31	48,06	8,17	0,64
	5	14	7,07	5,96	11,39	48,06	8,25	0,64
8	0	16	8,08	6,81	12,1	47,99	8,96	0,71
	2	16	8,08	6,81	12,67	47,99	9,53	0,71
	5	16	8,08	6,81	12,7	47,99	9,56	0,71
9	0	18	9,09	7,66	13,32	47,99	10,18	0,71
	2	18	9,09	7,66	13,95	47,99	10,81	0,71
	5	18	9,09	7,66	14,04	47,99	10,9	0,71
10	0	20	10,10	8,51	14,9	47,99	11,76	0,71



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

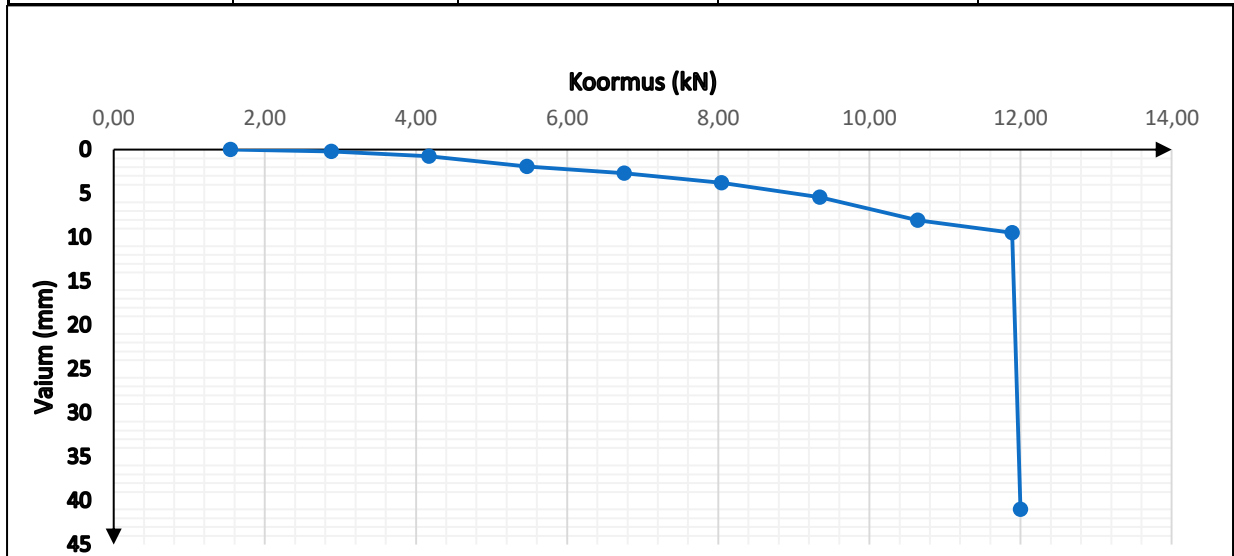
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,3	0,43
3	3	1,2	0,4

**2. Staatile koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatile katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	13,01	0
		2	13,01	0
		5	13,01	0
1	2,88	0	12,21	0,8
		2	12,22	0,79
		5	13,22	0,21
2	4,17	0	13,73	0,72
		2	13,75	0,74
		5	13,75	0,74
3	5,47	0	14,77	1,76
		2	14,9	1,89
		5	14,92	1,91
4	6,75	0	15,48	2,47
		2	15,7	2,69
		5	15,7	2,69
5	8,04	0	16,33	3,32
		2	16,74	3,73
		5	16,8	3,79
6	9,34	0	17,63	4,62
		2	18,33	5,32

		5	18,42	5,41
7	10,64	0	20,21	7,2
		2	21,02	8,01
		5	21,05	8,04
8	11,89	0	22,2	9,19
		2	22,30	9,29
		5	22,50	9,49
8	11,89	5	54	40,99



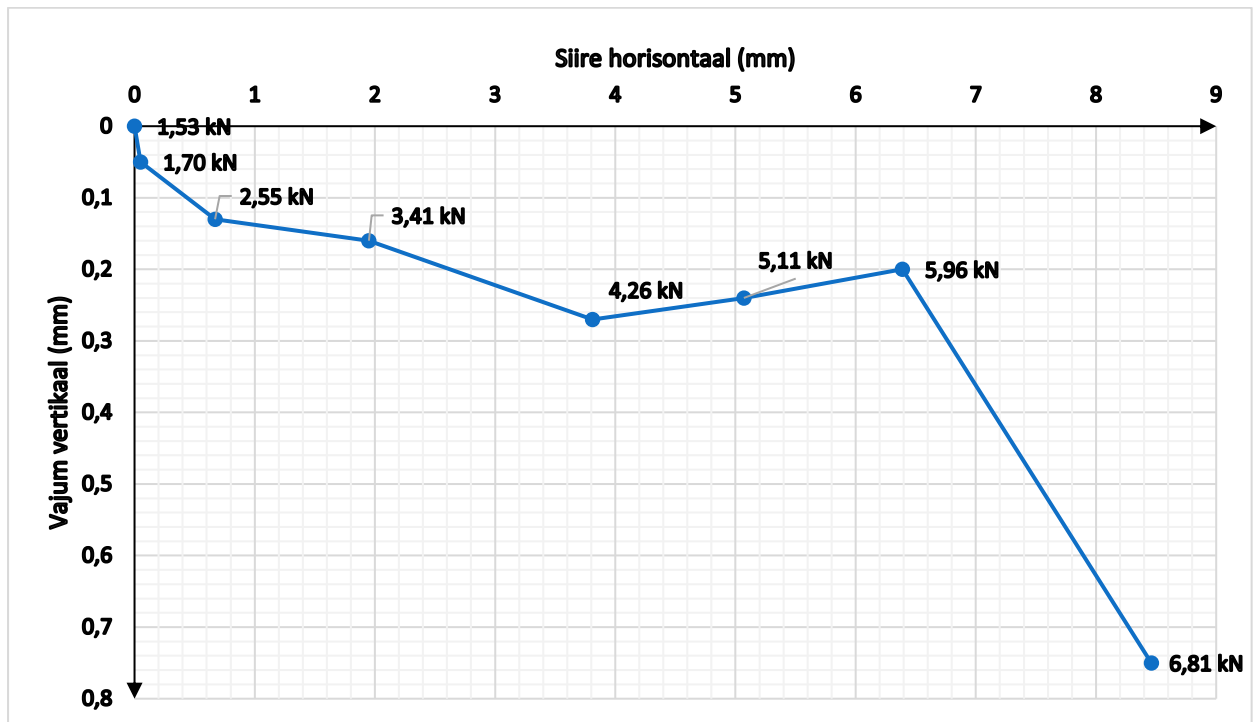
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

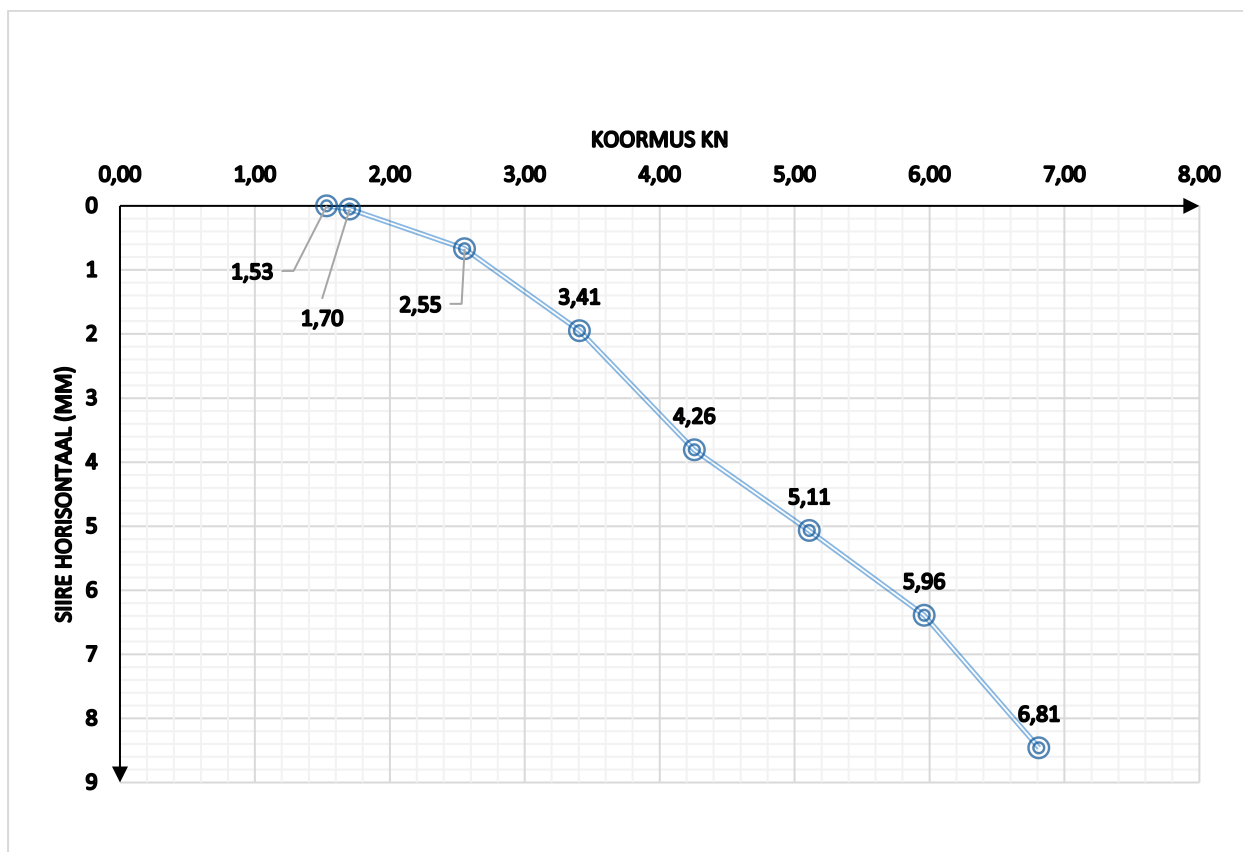
Vertikaalkoormus 6,75 kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	3,6	1,82	1,53	5,21	40,27	0	0
	2	3,6	1,82	1,53	5,21	40,27	0	0
	5	3,6	1,82	1,53	5,21	40,27	0	0
1	0	4	2,02	1,70	5,22	40,27	0,01	0
	2	4	2,02	1,70	5,26	40,3	0,05	0,03
	5	4	2,02	1,70	5,26	40,32	0,05	0,05
2	0	6	3,03	2,55	5,75	40,32	0,54	0,05
	2	6	3,03	2,55	5,87	40,39	0,66	0,12
	5	6	3,03	2,55	5,88	40,4	0,67	0,13
3	0	8	4,04	3,41	6,8	40,4	1,59	0,13
	2	8	4,04	3,41	7,13	40,42	1,92	0,15
	5	8	4,04	3,41	7,16	40,43	1,95	0,16
4	0	10	5,05	4,26	8,5	40,47	3,29	0,2
	2	10	5,05	4,26	9	40,52	3,79	0,25
	5	10	5,05	4,26	9,02	40,54	3,81	0,27
5	0	12	6,06	5,11	10	40,51	4,79	0,24

	2	12	6,06	5,11	10,25	40,51	5,04	0,24
	5	12	6,06	5,11	10,28	40,51	5,07	0,24
6	0	14	7,07	5,96	11,13	40,47	5,92	0,2
	2	14	7,07	5,96	11,49	40,47	6,28	0,2
	5	14	7,07	5,96	11,6	40,47	6,39	0,2
7	0	16	8,08	6,81	12,42	40,47	7,21	0,2
	2	16	8,08	6,81	13,37	40,84	8,16	0,57
	5	16	8,08	6,81	13,67	41,02	8,46	0,75



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik



Märkused: Pinnas on veega küllastunud

### 1. Dünaamiline katse

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

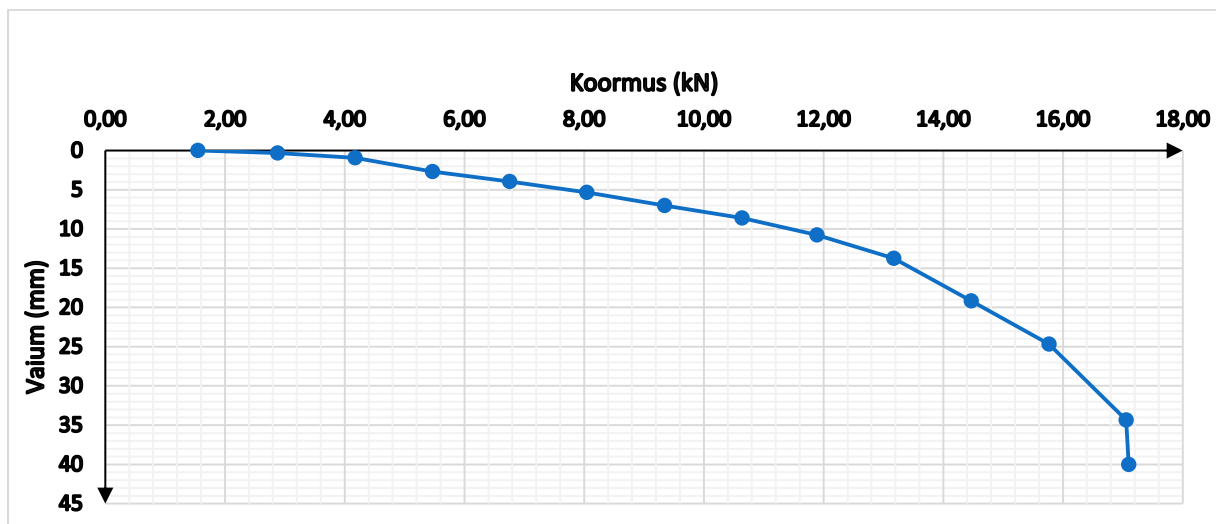
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,5	0,5
3	3	1,3	0,43

### 2. Staatiline koormuskatse

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	3,26	0
		2	3,26	0
		5	3,26	0
1	2,88	0	3,55	0,29
		2	3,57	0,31
		5	3,57	0,31
2	4,17	0	4,12	0,86
		2	4,19	0,93
		5	4,2	0,94
3	5,47	0	5,78	2,52
		2	5,89	2,63
		5	5,95	2,69
4	6,75	0	6,82	3,56
		2	7,1	3,84
		5	7,2	3,94
5	8,04	0	8,08	4,82
		2	8,52	5,26
		5	8,6	5,34
6	9,34	0	9,56	6,3
		2	10,14	6,88
		5	10,28	7,02
7	10,64	0	10,85	7,59
		2	11,63	8,37

		5	10,28	7,02
8	11,89	0	12,40	9,14
		2	13,98	10,72
		5	14,02	10,76
9	13,17	0	14,89	11,63
		2	16,50	13,24
		5	17,00	13,74
10	14,46	0	17,86	14,60
		2	20,16	16,90
		5	22,41	19,15
11	15,76	0	23,24	19,98
		2	27,15	23,89
		5	27,95	24,69
12	17,05	0	29,50	26,24
		2	37,50	34,24
		5	37,60	34,34
12	17,05	5	44	40,74



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

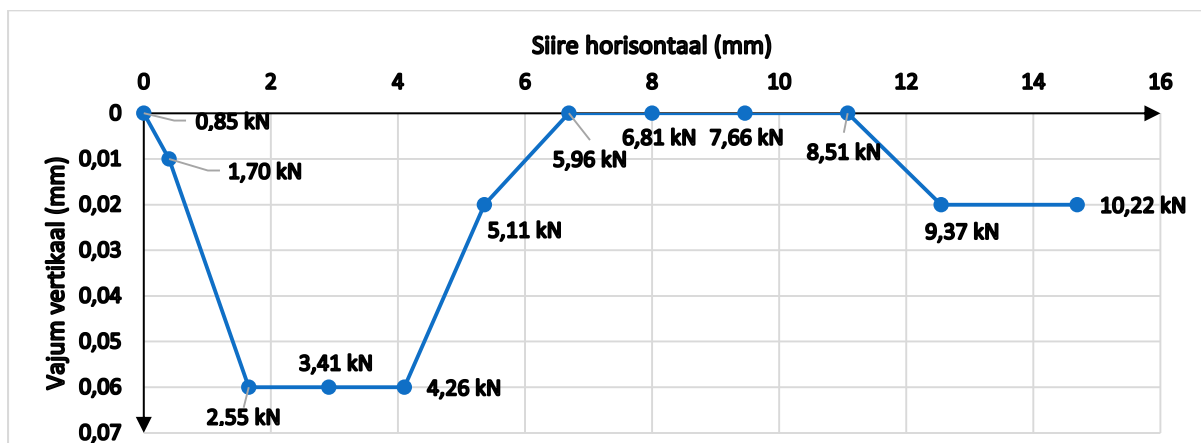
Vertikaalkoormus

8,04

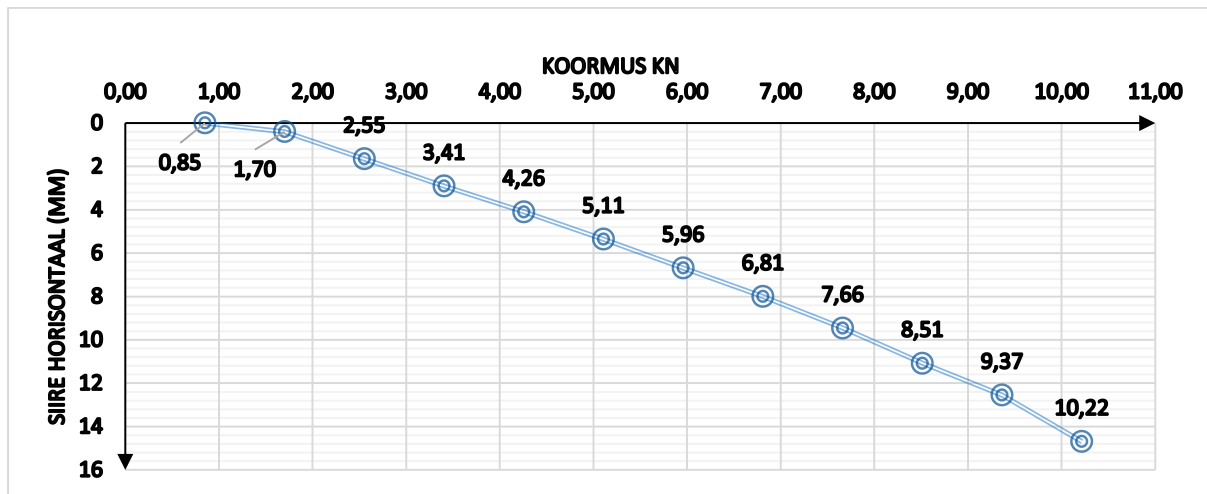
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2	1,01	0,85	13,1	38,35	0	0
	2	2	1,01	0,85	13,1	38,35	0	0
	5	2	1,01	0,85	13,1	38,35	0	0
1	0	4	2,02	1,70	13,4	38,36	0,3	0,01
	2	4	2,02	1,70	13,5	38,36	0,4	0,01
	5	4	2,02	1,70	13,5	38,36	0,4	0,01

2	0	6	3,03	2,55	14,4	38,39	1,3	0,04
	2	6	3,03	2,55	14,67	38,41	1,57	0,06
	5	6	3,03	2,55	14,75	38,41	1,65	0,06
3	0	8	4,04	3,41	15,78	38,41	2,68	0,06
	2	8	4,04	3,41	16	38,41	2,9	0,06
	5	8	4,04	3,41	16,01	38,41	2,91	0,06
4	0	10	5,05	4,26	16,82	38,41	3,72	0,06
	2	10	5,05	4,26	17,16	38,41	4,06	0,06
	5	10	5,05	4,26	17,2	38,41	4,1	0,06
5	0	12	6,06	5,11	18,1	38,37	5	0,02
	2	12	6,06	5,11	18,42	38,37	5,32	0,02
	5	12	6,06	5,11	18,46	38,37	5,36	0,02
6	0	14	7,07	5,96	19,38	38,35	6,28	0
	2	14	7,07	5,96	19,76	38,35	6,66	0
	5	14	7,07	5,96	19,79	38,35	6,69	0
7	0	16	8,08	6,81	20,63	38,35	7,53	0
	2	16	8,08	6,81	21,03	38,35	7,93	0
	5	16	8,08	6,81	21,1	38,35	8	0
8	0	18	9,09	7,66	21,98	38,35	8,88	0
	2	18	9,09	7,66	22,45	38,35	9,35	0
	5	18	9,09	7,66	22,56	38,35	9,46	0
9	0	20	10,10	8,51	23,49	38,35	10,39	0
	2	20	10,10	8,51	24,15	38,35	11,05	0
	5	20	10,10	8,51	24,18	38,35	11,08	0
10	0	20	10,10	5,10	24,9	38,37	11,8	0,02
	2	20	10,10	5,10	25,44	38,37	12,34	0,02
	5	20	10,10	5,10	25,65	38,37	12,55	0,02



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused: Pinnas on veega küllastunud

### 1. Dünaamiline katse

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

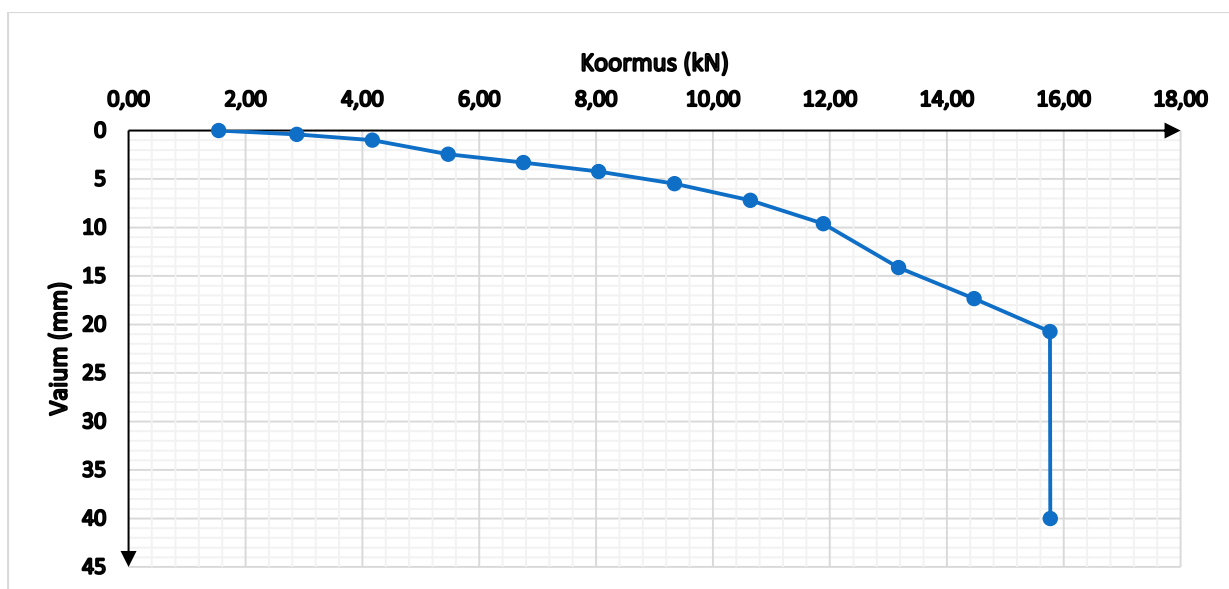
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,8	0,6
2	3	1,5	0,5
3	3	1,4	0,46

### 2. Staatileine koormuskatse

Tabel 2.1 Staatileise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	3,13	0
		2	3,13	0
		5	3,13	0
1	2,88	0	3,52	0,39
		2	3,52	0,39
		5	3,52	0,39
2	4,17	0	4,06	0,93
		2	4,1	0,97
		5	4,11	0,98
3	5,47	0	5,43	2,3
		2	5,54	2,41
		5	5,56	2,43
4	6,75	0	6,19	3,06
		2	6,37	3,24
		5	6,43	3,3
5	8,04	0	7,03	3,9
		2	7,3	4,17
		5	7,37	4,24
6	9,34	0	8,07	4,94
		2	8,51	5,38
		5	8,6	5,47
7	10,64	0	9,45	6,32

		2	10,15	7,02
		5	10,32	7,19
8	11,89	0	11,27	8,14
		2	12,42	9,29
		5	12,71	9,58
9	13,17	0	14,23	11,1
		2	16,72	13,59
		5	17,26	14,13
10	14,46	0	19,70	16,57
		2	20,26	17,13
		5	20,47	17,34
11	15,76	0	20,85	17,72
		2	23,13	20
		5	23,85	20,72
11	15,76	5	43	39,87



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

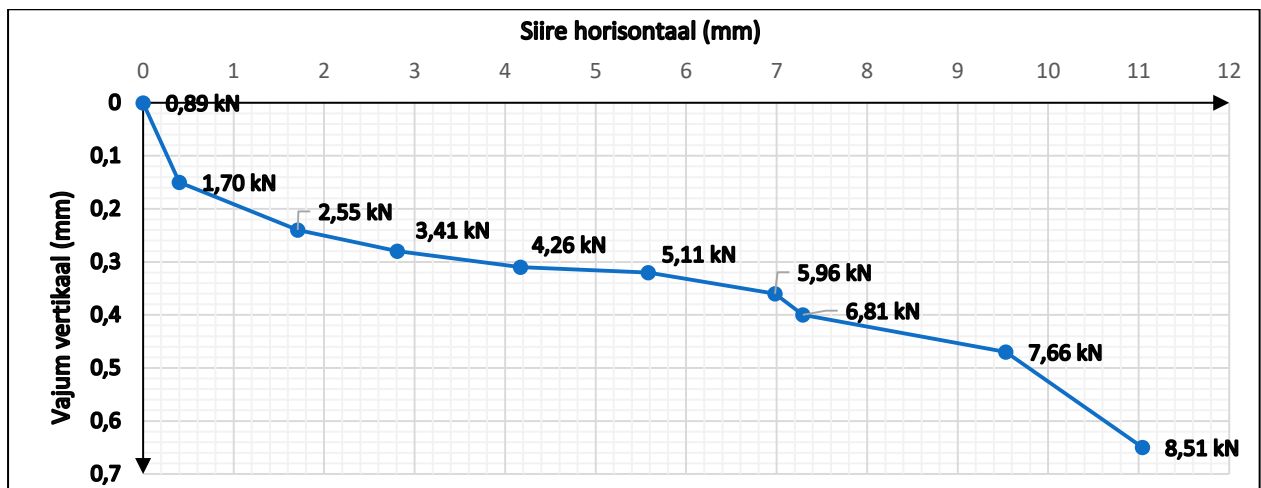
Vertikaalkoormus

8,04

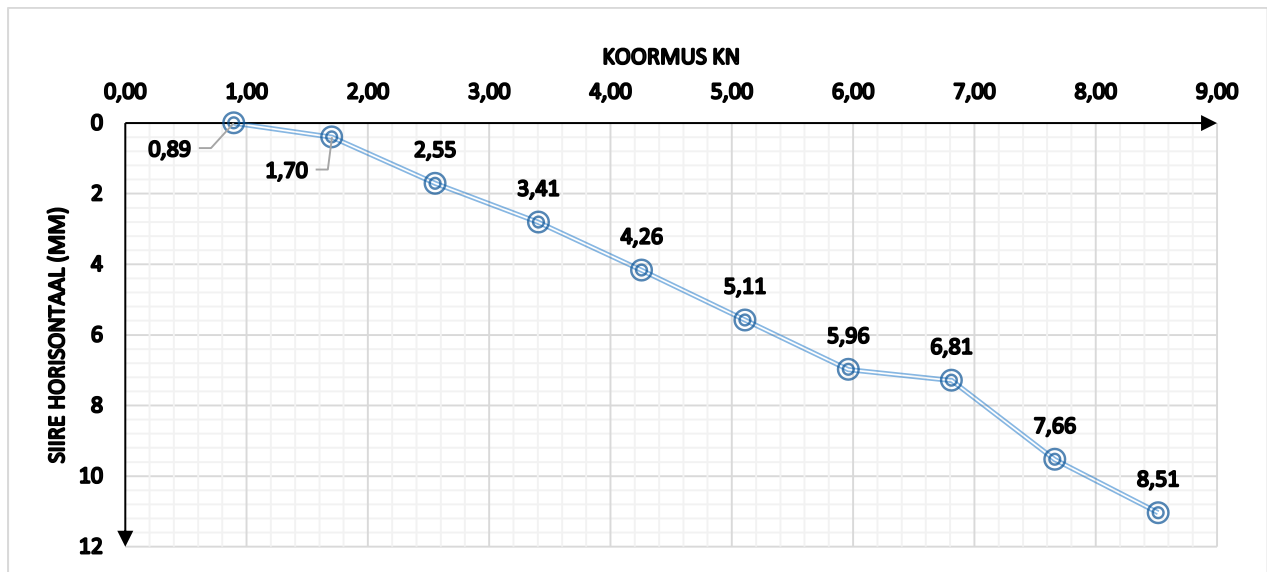
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,1	1,06	0,89	5,04	53,42	0	0
	2	2,1	1,06	0,89	5,04	53,42	0	0
	5	2,1	1,06	0,89	5,04	53,42	0	0
1	0	4	2,02	1,70	5,24	53,51	0,2	0,09
	2	4	2,02	1,70	5,43	53,57	0,39	0,15
	5	4	2,02	1,70	5,44	53,57	0,4	0,15

2	0	6	3,03	2,55	6,42	53,6	1,38	0,18
	2	6	3,03	2,55	6,68	53,66	1,64	0,24
	5	6	3,03	2,55	6,75	53,66	1,71	0,24
3	0	8	4,04	3,41	7,51	53,68	2,47	0,26
	2	8	4,04	3,41	7,84	53,7	2,8	0,28
	5	8	4,04	3,41	7,85	53,7	2,81	0,28
4	0	10	5,05	4,26	8,84	53,7	3,8	0,28
	2	10	5,05	4,26	9,18	53,71	4,14	0,29
	5	10	5,05	4,26	9,21	53,73	4,17	0,31
5	0	12	6,06	5,11	10,2	53,73	5,16	0,31
	2	12	6,06	5,11	10,53	53,73	5,49	0,31
	5	12	6,06	5,11	10,62	53,74	5,58	0,32
6	0	14	7,07	5,96	11,53	53,75	6,49	0,33
	2	14	7,07	5,96	11,84	53,76	6,8	0,34
	5	14	7,07	5,96	12,02	53,78	6,98	0,36
7	0	16	8,08	6,81	12,82	53,78	7,78	0,36
	2	16	8,08	6,81	13,24	53,8	8,2	0,38
	5	16	8,08	6,81	13,33	53,82	8,29	0,4
8	0	18	9,09	7,66	13,98	53,81	8,94	0,39
	2	18	9,09	7,66	14,42	53,86	9,38	0,44
	5	18	9,09	7,66	14,57	53,89	9,53	0,47
9	0	20	10,10	8,51	15,9	53,99	10,86	0,57
	2	20	10,10	8,51	15,96	54,02	10,92	0,6
	5	20	10,10	8,51	16,08	54,07	11,04	0,65



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik



Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

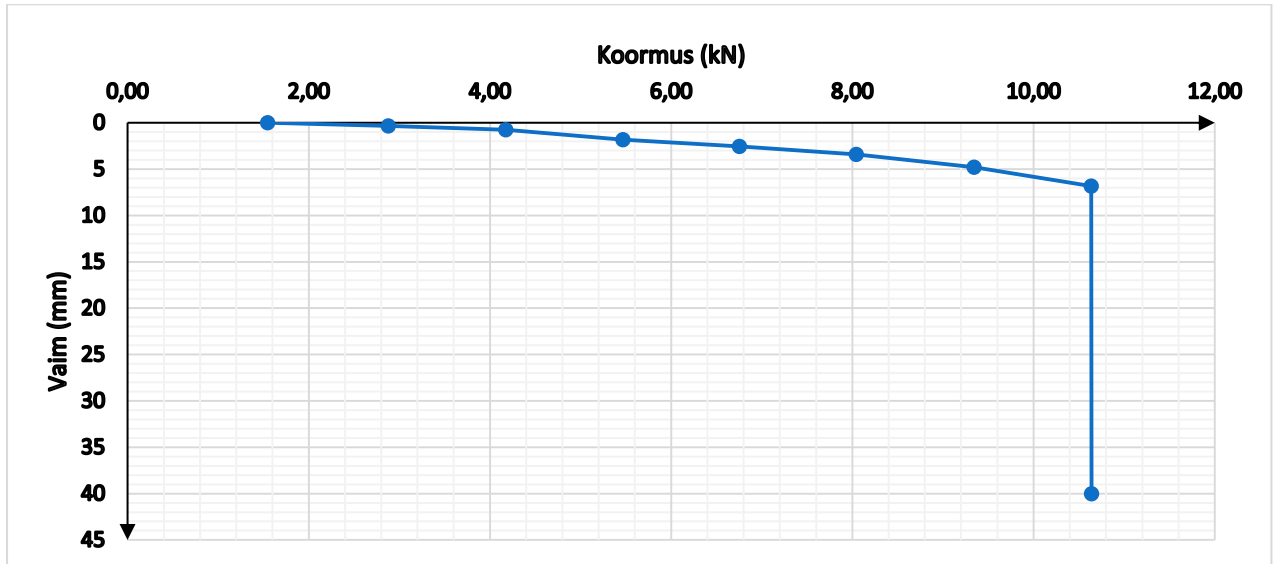
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,8	0,6
2	3	1,4	0,46
3	3	1,4	0,46

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	5,96	0
		2	5,96	0
		5	5,96	0
1	2,88	0	6,28	0,32
		2	6,3	0,34
		5	6,31	0,35
2	4,17	0	6,65	0,69
		2	6,72	0,76
		5	6,73	0,77
3	5,47	0	7,67	1,71
		2	7,76	1,8
		5	7,8	1,84
4	6,75	0	8,26	2,3
		2	8,45	2,49
		5	8,51	2,55
5	8,04	0	9,1	3,14
		2	9,36	3,4
		5	9,38	3,42
6	9,34	0	9,99	4,03

		2	10,66	4,7
		5	10,75	4,79
7	10,64	0	11,35	5,39
		2	12,77	6,81
		5	12,81	6,85
7	10,64	5	46	40



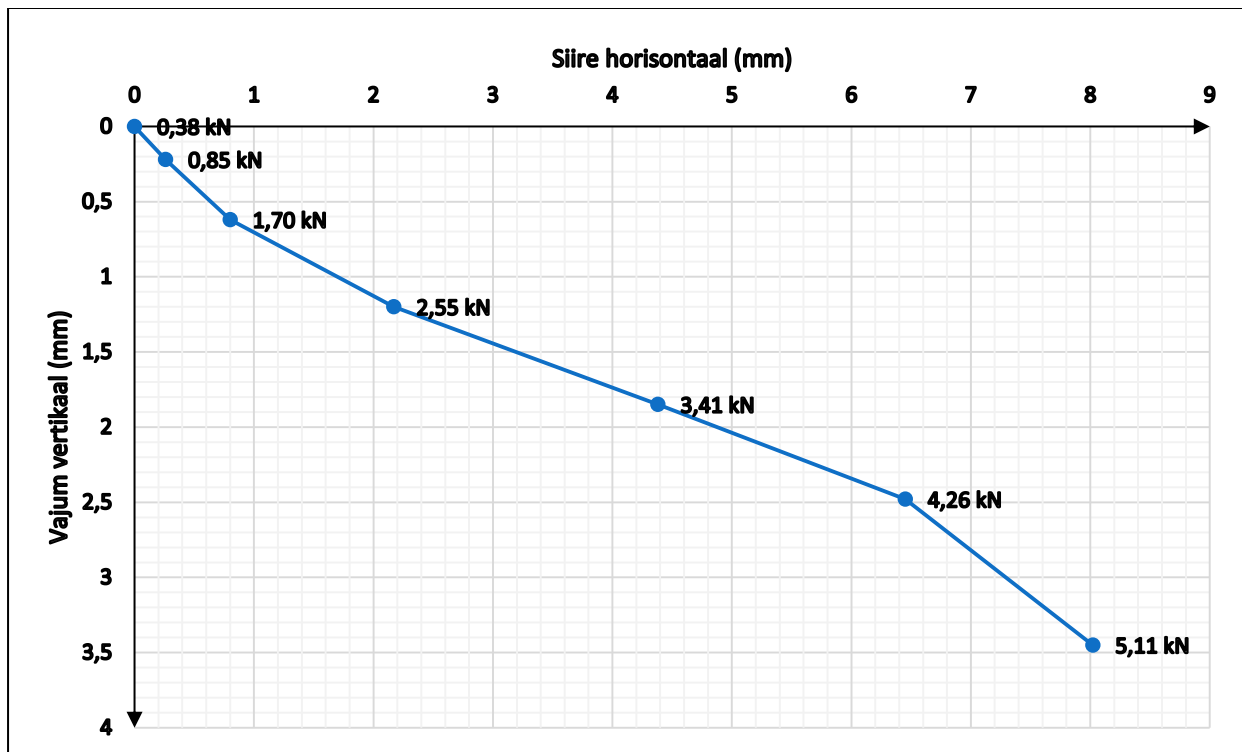
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

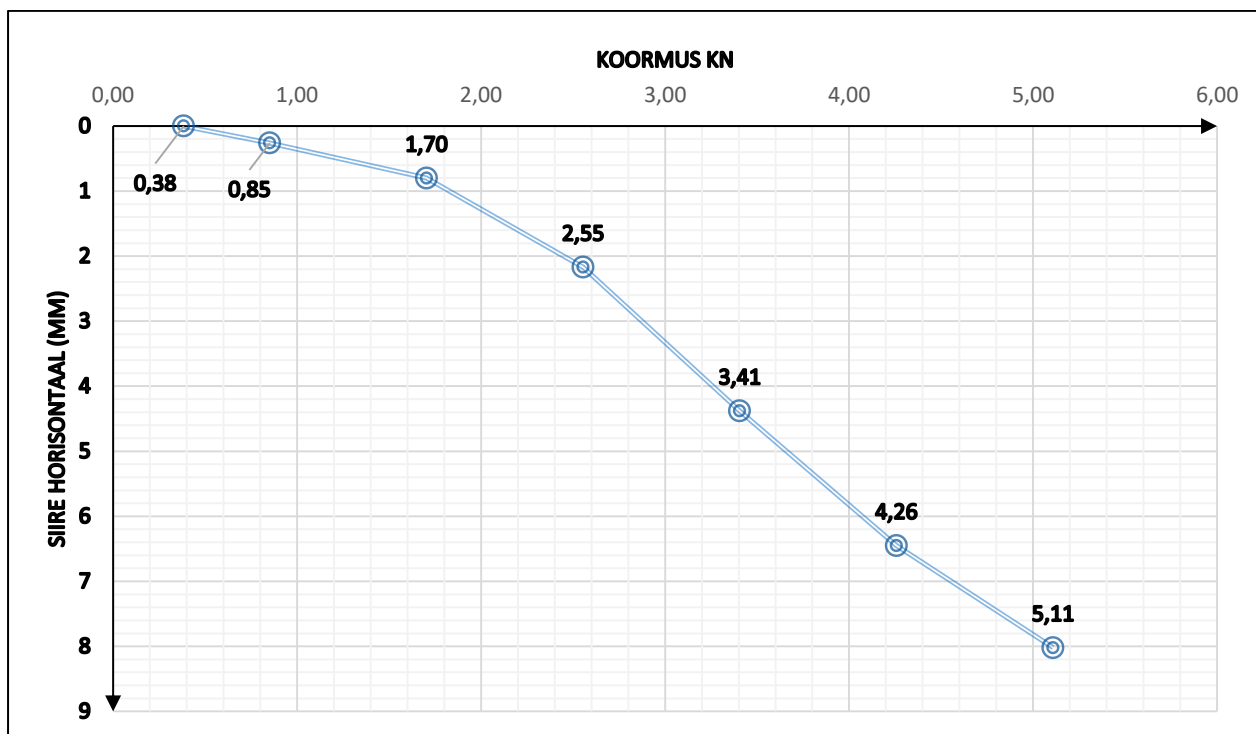
Vertikaalkoormus 8,04 kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	0,9	0,45	0,38	5,85	28,49	0	0
	2	0,9	0,45	0,38	5,85	28,49	0	0
	5	0,9	0,45	0,38	5,85	28,49	0	0
1	0	2	1,01	0,85	5,97	28,55	0,12	0,06
	2	2	1,01	0,85	6,11	28,69	0,26	0,2
	5	2	1,01	0,85	6,11	28,72	0,26	0,23
2	0	4	2,02	1,70	6,5	28,9	0,65	0,41
	2	4	2,02	1,70	6,64	29,06	0,79	0,57
	5	4	2,02	1,70	6,65	29,12	0,8	0,63
3	0	6	3,03	2,55	7,5	29,3	1,65	0,81
	2	6	3,03	2,55	7,89	29,65	2,04	1,16
	5	6	3,03	2,55	8,02	29,7	2,17	1,21
4	0	8	4,04	3,41	9,55	29,89	3,7	1,4

	2	8	4,04	3,41	10,09	30,28	4,24	1,79
	5	8	4,04	3,41	10,23	30,35	4,38	1,86
5	0	10	5,05	4,26	11,53	30,36	5,68	1,87
	2	10	5,05	4,26	12,1	30,78	6,25	2,29
	5	10	5,05	4,26	12,3	30,98	6,45	2,49
6	0	12	6,06	5,11	13,41	31,8	7,56	3,31
	2	12	6,06	5,11	13,45	31,8	7,6	3,31
	5	12	6,06	5,11	13,87	31,87	8,02	3,38



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused: Pinnas on veega küllastunud

### 1. Dünaamiline katse

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

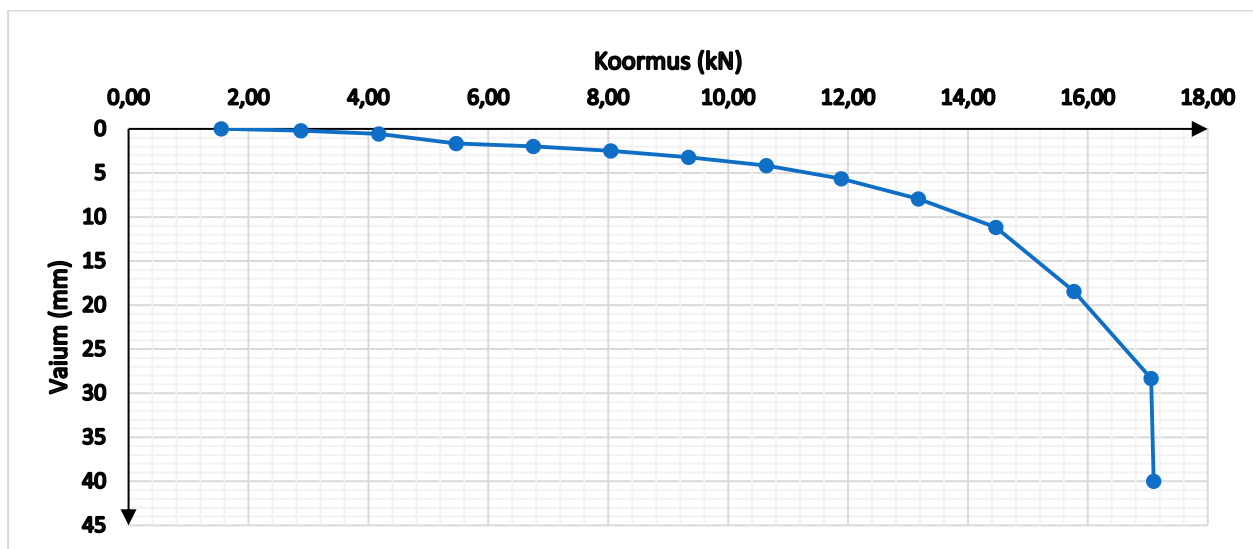
Järjekorra nr	Löövide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,1	0,36

### 2. Staatileine koormuskatse

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	20,46	0
		2	20,46	0
		5	20,46	0
1	2,88	0	20,65	0,19
		2	20,65	0,19
		5	20,65	0,19
2	4,17	0	21,01	0,55
		2	21,01	0,55
		5	21,01	0,55
3	5,47	0	22,1	1,64
		2	22,13	1,67
		5	22,13	1,67
4	6,75	0	22,4	1,94
		2	22,44	1,98
		5	22,44	1,98
5	8,04	0	22,87	2,41

		2	22,94	2,48
		5	22,94	2,48
6	9,34	0	23,45	2,99
		2	23,61	3,15
		5	23,66	3,2
7	10,64	0	24,25	3,79
		2	24,59	4,13
		5	24,64	4,18
8	11,89	0	25,43	4,97
		2	25,87	5,41
		5	26,13	5,67
9	13,17	0	26,9	6,44
		2	27,91	7,45
		5	28,39	7,93
10	14,46	0	29	8,54
		2	31,04	10,58
		5	31,64	11,18
11	15,76	0	32,8	12,34
		2	36,56	16,1
		5	38,91	18,45
12	17,05	0	41,5	21,04
		2	44,45	23,99
		5	48,8	28,34



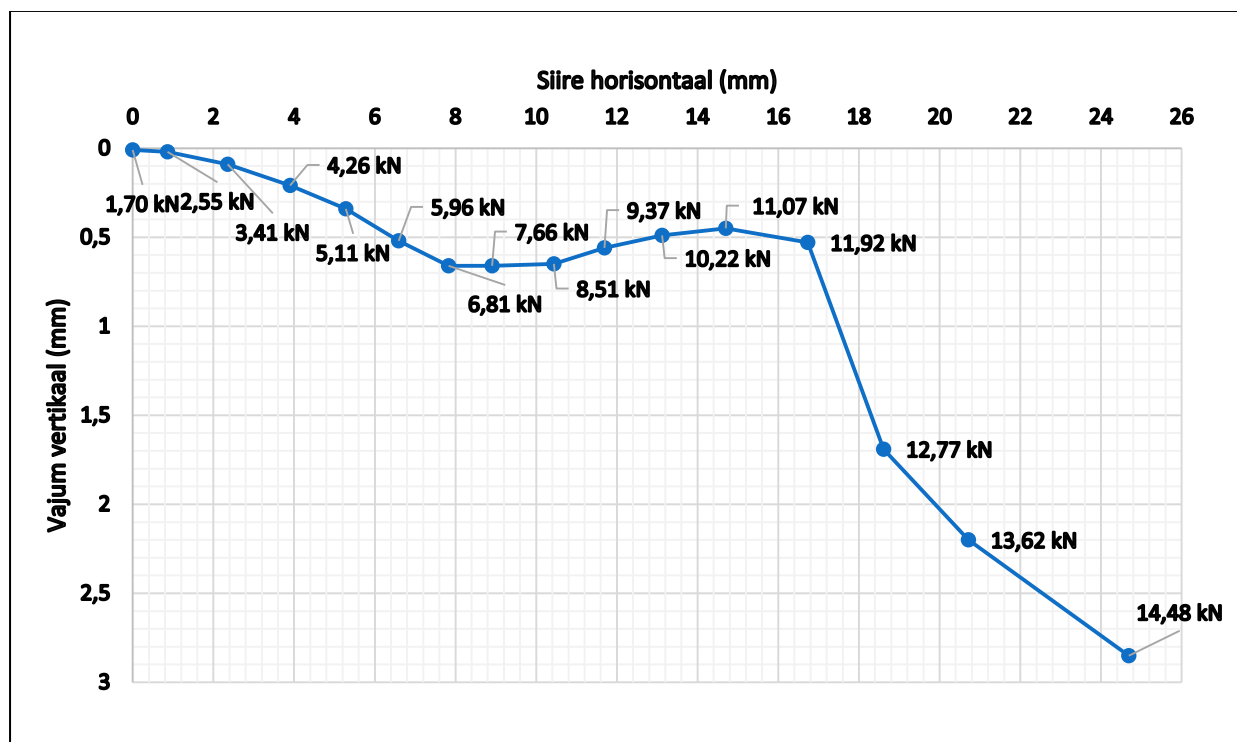
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 9,34 kN

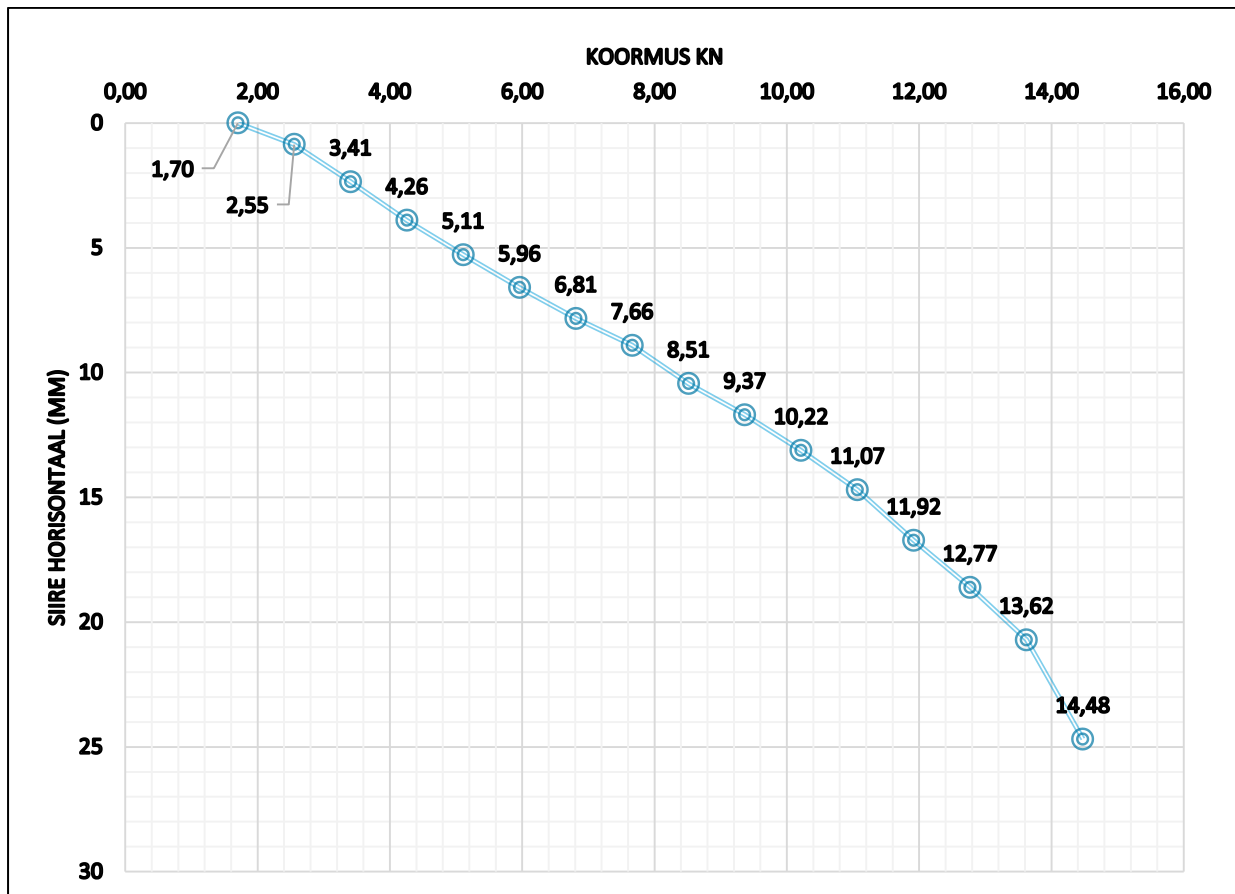
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	4	2,02	1,7	2,06	57,35	0	0
	2	4	2,02	1,7	2,1	57,35	0,04	0
	5	4	2,02	1,7	2,11	57,36	0,05	0,01
1	0	6	3,03	2,55	2,75	57,33	0,69	0,02
	2	6	3,03	2,55	2,93	57,33	0,87	0,02
	5	6	3,03	2,55	2,97	57,33	0,91	0,02
2	0	8	4,04	3,41	3,85	57,26	1,79	0,09
	2	8	4,04	3,41	4,35	57,26	2,29	0,09
	5	8	4,04	3,41	4,46	57,26	2,4	0,09
3	0	10	5,05	4,26	5,54	57,13	3,48	0,22
	2	10	5,05	4,26	5,9	57,26	3,84	0,09
	5	10	5,05	4,26	6,01	57,14	3,95	0,21
4	0	12	6,06	5,11	6,8	57,05	4,74	0,3
	2	12	6,06	5,11	7,23	57,04	5,17	0,31
	5	12	6,06	5,11	7,39	57,01	5,33	0,34
5	0	14	7,07	5,96	8,15	56,89	6,09	0,46
	2	14	7,07	5,96	8,54	56,86	6,48	0,49
	5	14	7,07	5,96	8,7	56,83	6,64	0,52
6	0	16	8,08	6,81	9,35	56,89	7,29	0,46
	2	16	8,08	6,81	9,8	56,69	7,74	0,66
	5	16	8,08	6,81	9,94	56,69	7,88	0,66
7	0	18	9,09	7,66	10,38	56,62	8,32	0,73
	2	18	9,09	7,66	10,88	56,69	8,82	0,66
	5	18	9,09	7,66	11,02	56,69	8,96	0,66
8	0	20	10,1	8,51	12,02	56,7	9,96	0,65
	2	20	10,1	8,51	12,42	56,7	10,36	0,65
	5	20	10,1	8,51	12,55	56,7	10,49	0,65
9	0	22	11,11	9,36	13,32	56,78	11,26	0,57
	2	22	11,11	9,36	13,63	56,79	11,57	0,56
	5	22	11,11	9,36	13,8	56,79	11,74	0,56
10	0	24	12,12	10,22	14,6	56,82	12,54	0,53
	2	24	12,12	10,22	15,13	56,84	13,07	0,51
	5	24	12,12	10,22	15,23	56,86	13,17	0,49
11	0	26	13,13	11,07	15,76	57,73	13,7	0,38
	2	26	13,13	11,07	16,56	57,79	14,5	0,44
	5	26	13,13	11,07	16,81	57,8	14,75	0,45
12	0	28	14,14	11,92	17,4	57,84	15,34	0,49
	2	28	14,14	11,92	18,43	57,87	16,37	0,52
	5	28	14,14	11,92	18,84	57,88	16,78	0,53
13	0	30	15,15	12,77	19,3	58,76	17,24	1,41

	2	30	15,15	12,77	20,48	58,87	18,42	1,52
	5	30	15,15	12,77	20,72	59,04	18,66	1,69
14	0	32	16,16	13,62	21,11	59,22	19,05	1,87
	2	32	16,16	13,62	22,64	59,4	20,58	2,05
	5	32	16,16	13,62	22,82	59,55	20,76	2,2
15	0	34	17,17	14,48	23,4	59,75	21,34	2,4
	2	34	17,17	14,48	25,18	60,1	23,12	2,75
	5	34	17,17	14,48	26,8	60,2	24,74	2,85



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

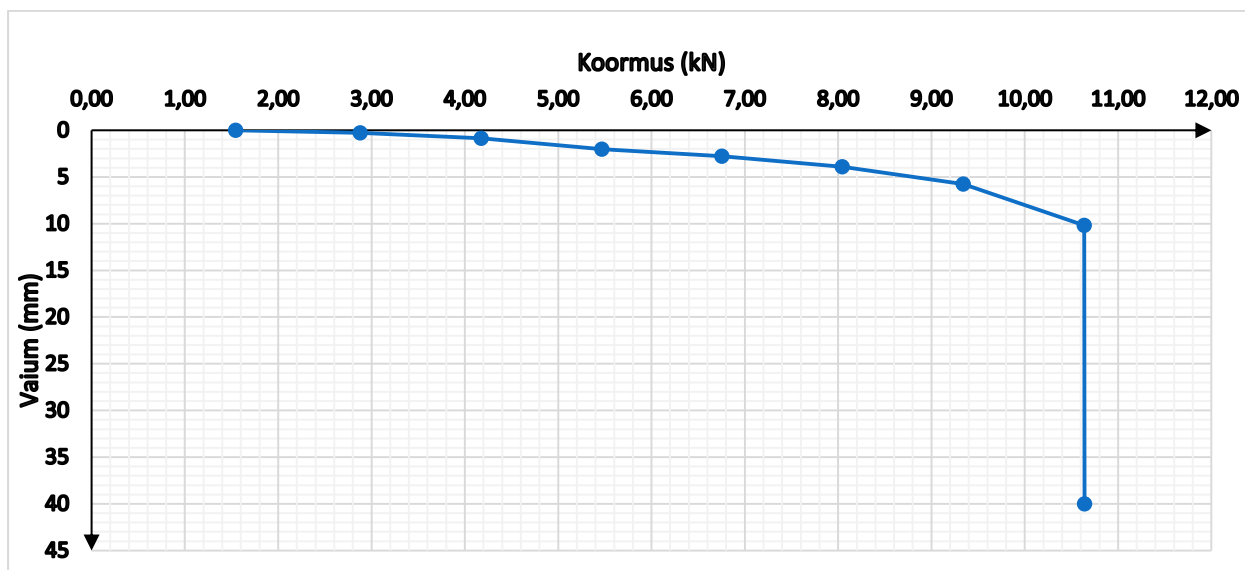
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,6	0,53
2	3	1,5	0,5
3	3	1,4	0,46

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	7,97	0
		2	7,97	0
		5	7,97	0
1	2,88	0	8,2	0,23
		2	8,23	0,26
		5	8,23	0,26
2	4,17	0	8,74	0,77
		2	8,82	0,85
		5	8,82	0,85
3	5,47	0	9,78	1,81
		2	9,97	2
		5	9,98	2,01
4	6,75	0	10,48	2,51
		2	10,75	2,78
		5	10,75	2,78
5	8,04	0	11,44	3,47
		2	11,86	3,89
		5	11,88	3,91
6	9,34	0	12,61	4,64
		2	13,58	5,61
		5	13,72	5,75

7	10,64	0	15,76	7,79
		2	17,03	9,06
		5	18,14	10,17
7	10,64	5	48	40,03



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

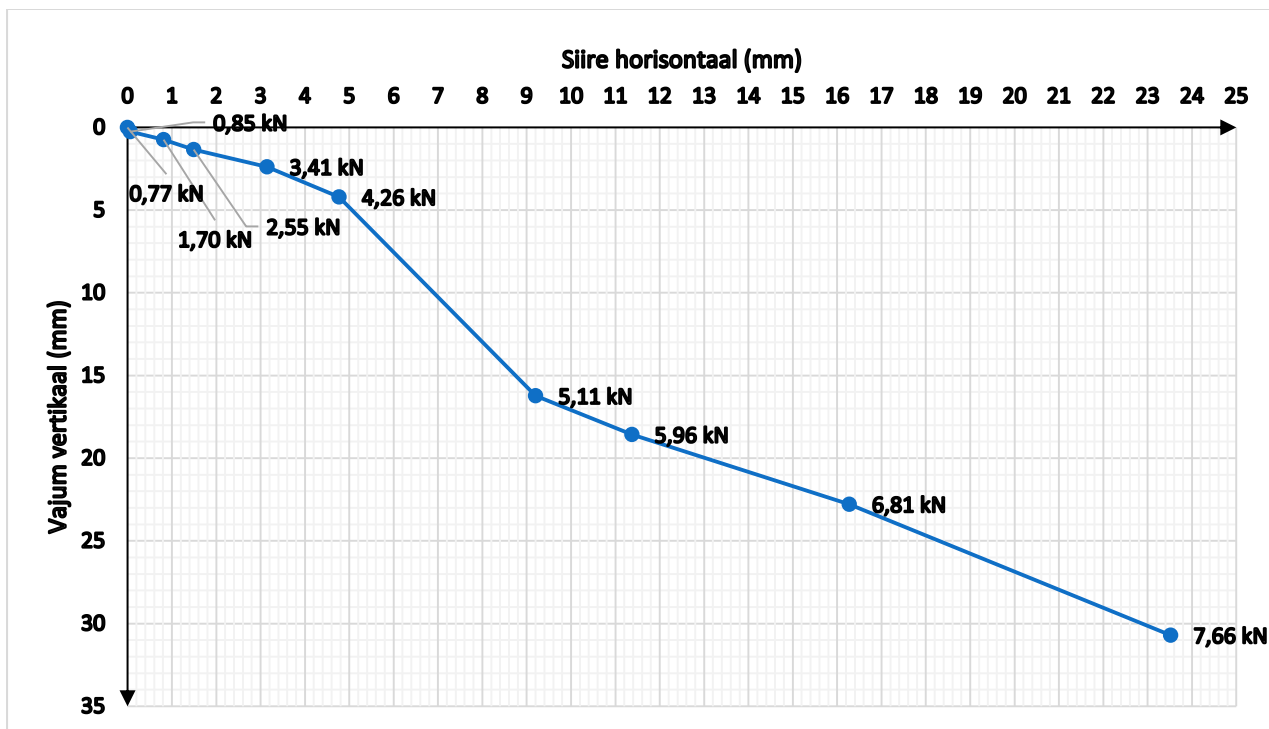
Vertikaalkoormus

9,34

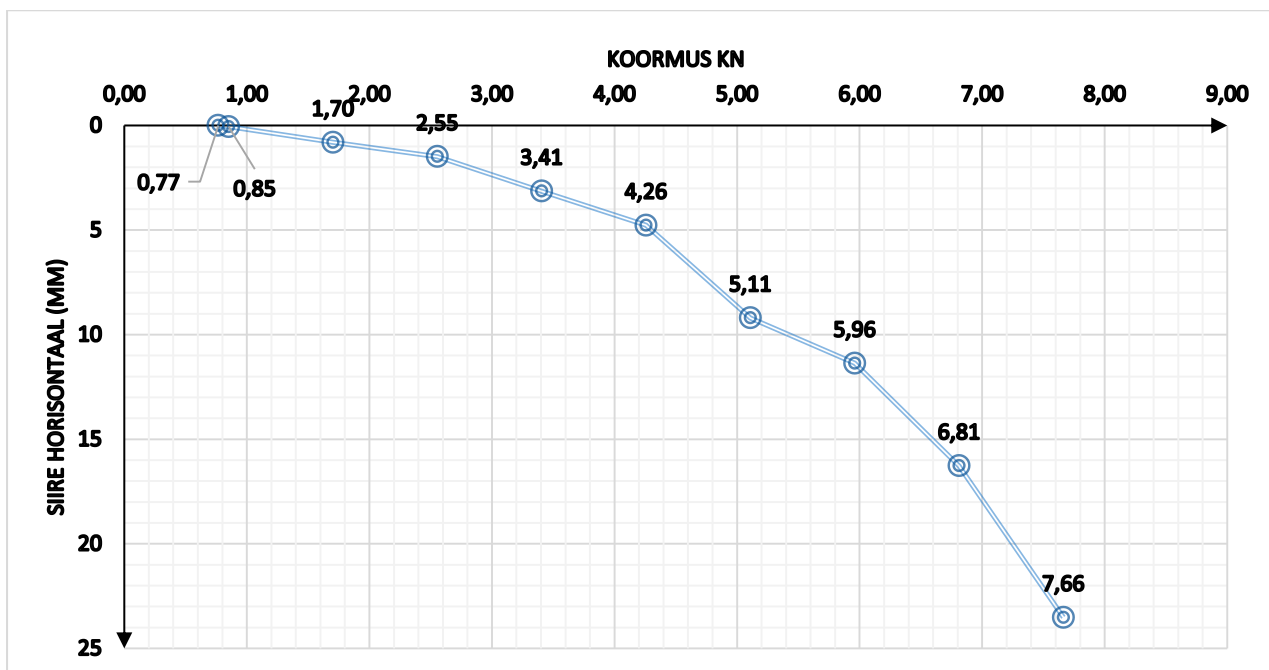
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,8	0,91	0,76	2,78	47,52	0	0
	2	1,8	0,91	0,76	2,78	47,52	0	0
	5	1,8	0,91	0,76	2,81	47,57	0,03	0,05
1	0	2	1,01	0,85	2,82	47,6	0,04	0,08
	2	2	1,01	0,85	2,84	47,7	0,06	0,18
	5	2	1,01	0,85	2,87	47,82	0,09	0,3
2	0	4	2,02	1,70	3,26	47,86	0,48	0,34
	2	4	2,02	1,70	3,54	48,2	0,76	0,68
	5	4	2,02	1,70	3,62	48,31	0,84	0,79
3	0	6	3,03	2,55	4,14	48,42	1,36	0,9
	2	6	3,03	2,55	4,45	48,87	1,67	1,35
	5	6	3,03	2,55	4,3	48,92	1,52	1,4
4	0	8	4,04	3,41	5,47	49,18	2,69	1,66
	2	8	4,04	3,41	5,87	49,74	3,09	2,22
	5	8	4,04	3,41	5,95	49,95	3,17	2,43
5	0	10	5,05	4,26	6,81	50,05	4,03	2,53
	2	10	5,05	4,26	7,49	51,58	4,71	4,06
	5	10	5,05	4,26	7,58	51,78	4,8	4,26
6	0	12	6,06	5,11	8,35	51,94	5,57	4,42
	2	12	6,06	5,11	11,71	62,11	8,93	14,59
	5	12	6,06	5,11	12,01	63,8	9,23	16,28
7	0	14	7,07	5,96	13,44	65,1	10,66	17,58
	2	14	7,07	5,96	14,03	65,97	11,25	18,45
	5	14	7,07	5,96	14,18	66,14	11,4	18,62
8	0	16	8,08	6,81	16,83	60,39	14,05	12,87

9	2	16	8,08	6,81	18,38	69,54	15,6	22,02
	5	16	8,08	6,81	19,08	70,35	16,3	22,83
	0	18	9,09	7,66	20,91	71,22	18,13	23,7
	2	18	9,09	7,66	26,33	78,27	23,55	30,75
	5	18	9,09	7,66	26,33	78,27	23,55	30,75



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

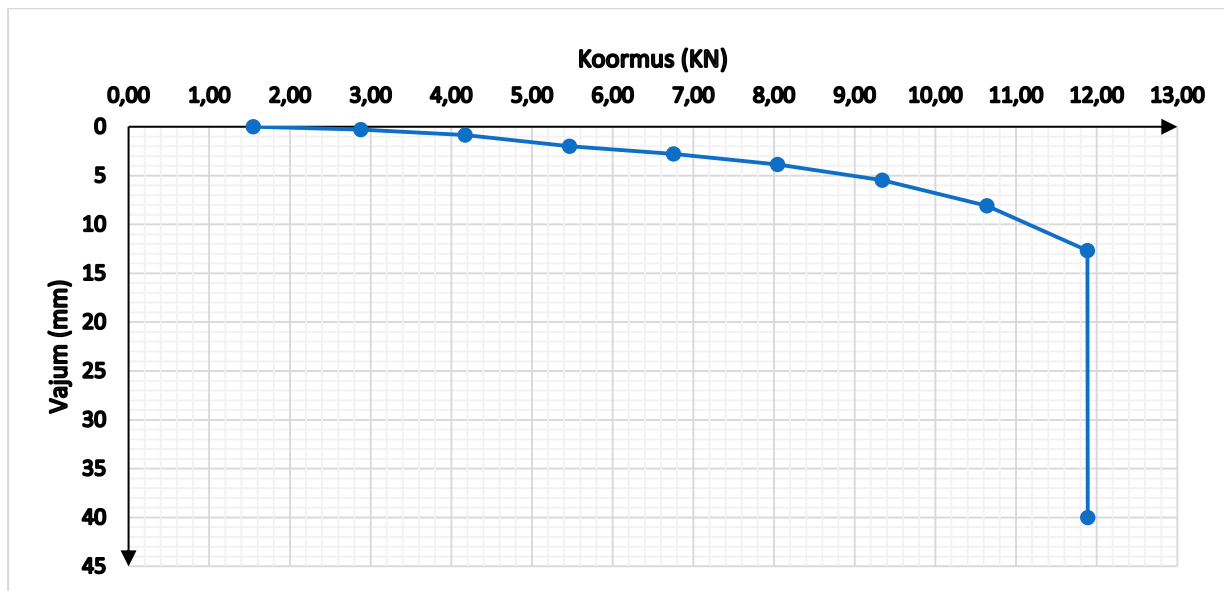
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,8	0,6
2	3	1,5	0,5
3	3	1,4	0,46

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilese katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	9,64	0
		2	9,64	0
		5	9,64	0
1	2,88	0	9,88	0,24
		2	9,93	0,29
		5	9,93	0,29
2	4,17	0	10,01	0,37
		2	10,49	0,85
		5	10,49	0,85
3	5,47	0	11,49	1,85
		2	11,63	1,99
		5	11,65	2,01
4	6,75	0	12,1	2,46
		2	12,38	2,74
		5	12,42	2,78
5	8,04	0	13,06	3,42
		2	13,45	3,81
		5	13,5	3,86
6	9,34	0	14,3	4,66
		2	15	5,36
		5	15,11	5,47

7	10,64	0	16,08	6,44
		2	17,46	7,82
		5	17,74	8,1
8	11,89	0	20,2	10,56
		2	21,73	12,09
		5	22,33	12,69



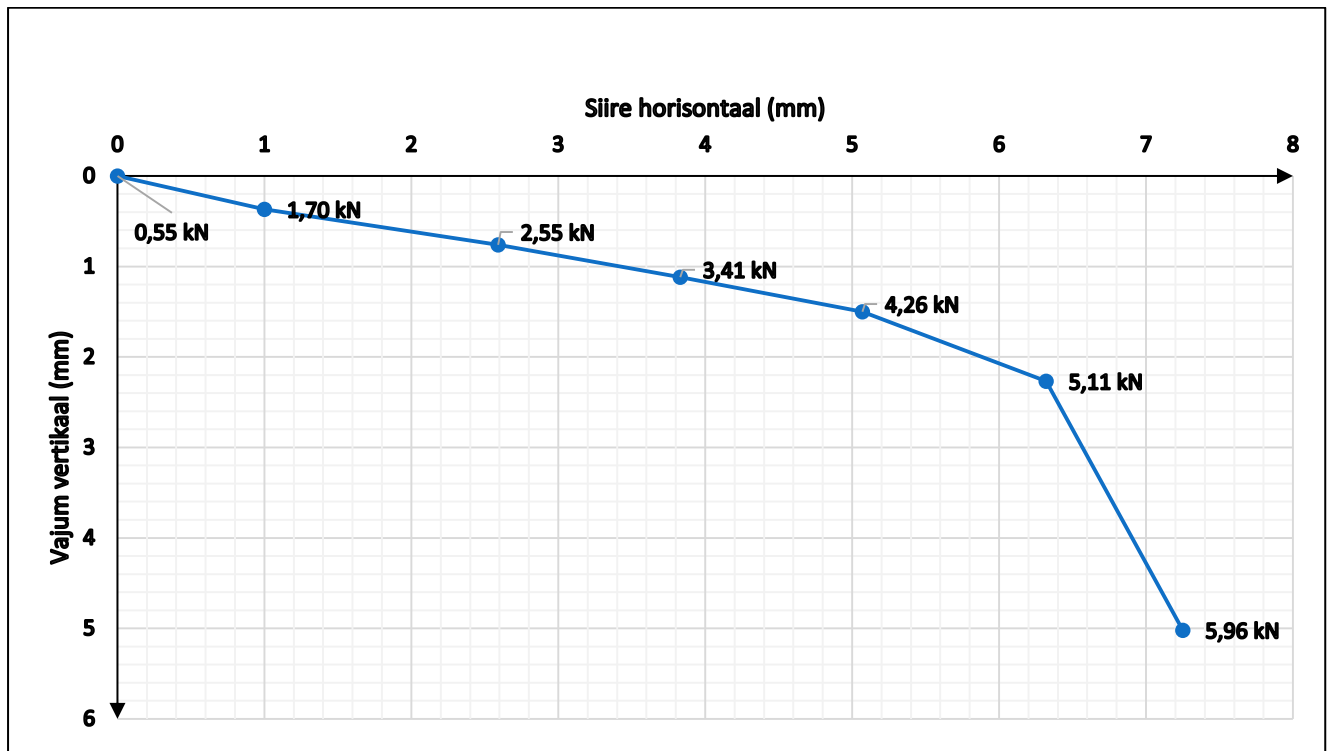
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 9,34 kN

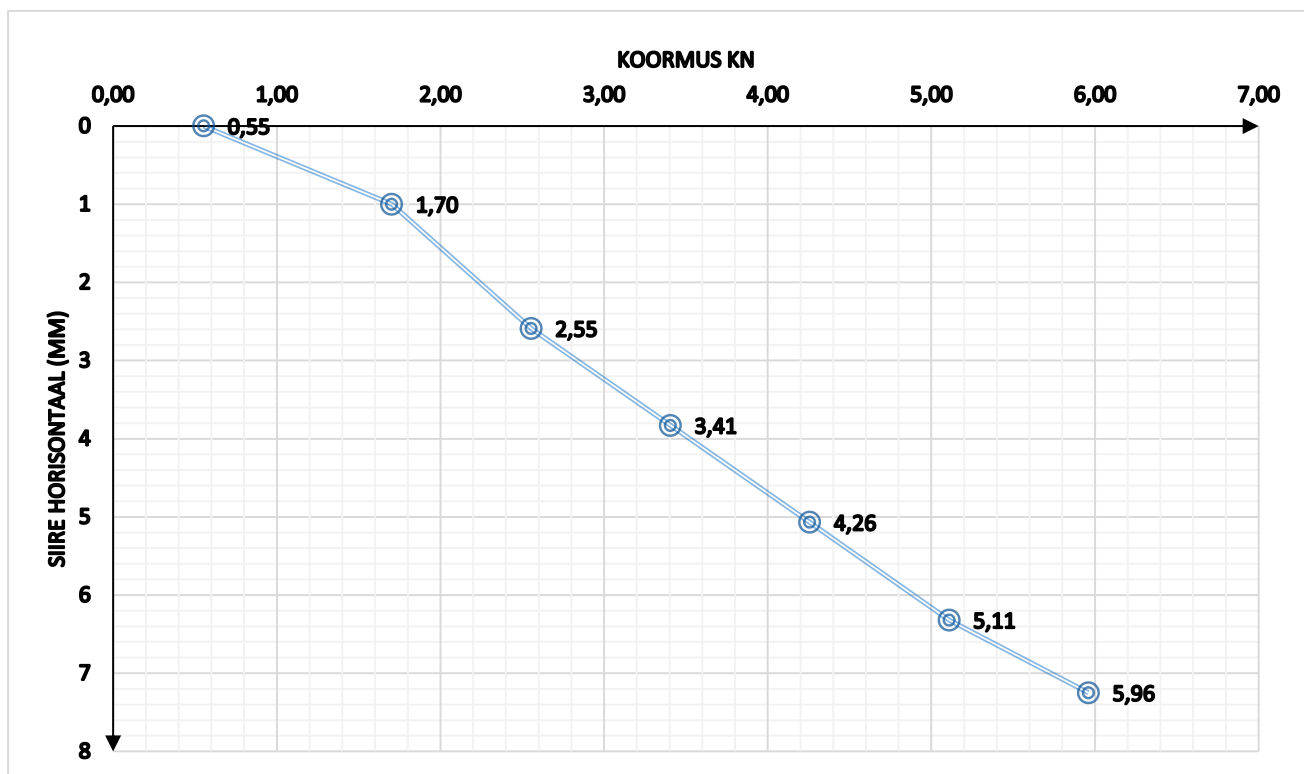
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	1,3	0,66	0,55	8,71	30,31	0	0
	2	1,3	0,66	0,55	8,73	30,42	0,02	0,11
	5	1,3	0,66	0,55	8,73	30,43	0,02	0,12
1	0	4	2,02	1,70	9,46	30,58	0,75	0,27
	2	4	2,02	1,70	9,76	30,75	1,05	0,44
	5	4	2,02	1,70	9,73	30,8	1,02	0,49
2	0	6	3,03	2,55	10,9	30,96	2,19	0,65
	2	6	3,03	2,55	11,28	31,14	2,57	0,83
	5	6	3,03	2,55	11,32	31,19	2,61	0,88
3	0	8	4,04	3,41	12,2	31,22	3,49	0,91
	2	8	4,04	3,41	12,51	31,47	3,8	1,16
	5	8	4,04	3,41	12,56	31,55	3,85	1,24
4	0	10	5,05	4,26	13,36	31,55	4,65	1,24
	2	10	5,05	4,26	13,7	31,84	4,99	1,53

	5	10	5,05	4,26	13,8	31,93	5,09	1,62
5	0	12	6,06	5,11	14,57	31,95	5,86	1,64
	2	12	6,06	5,11	15,02	32,57	6,31	2,26
	5	12	6,06	5,11	15,05	32,7	6,34	2,39
6	0	14	7,07	5,96	15,78	35,4	7,07	5,09
	2	14	7,07	5,96	15,8	35,41	7,09	5,1
	5	14	7,07	5,96	15,98	35,45	7,27	5,14



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

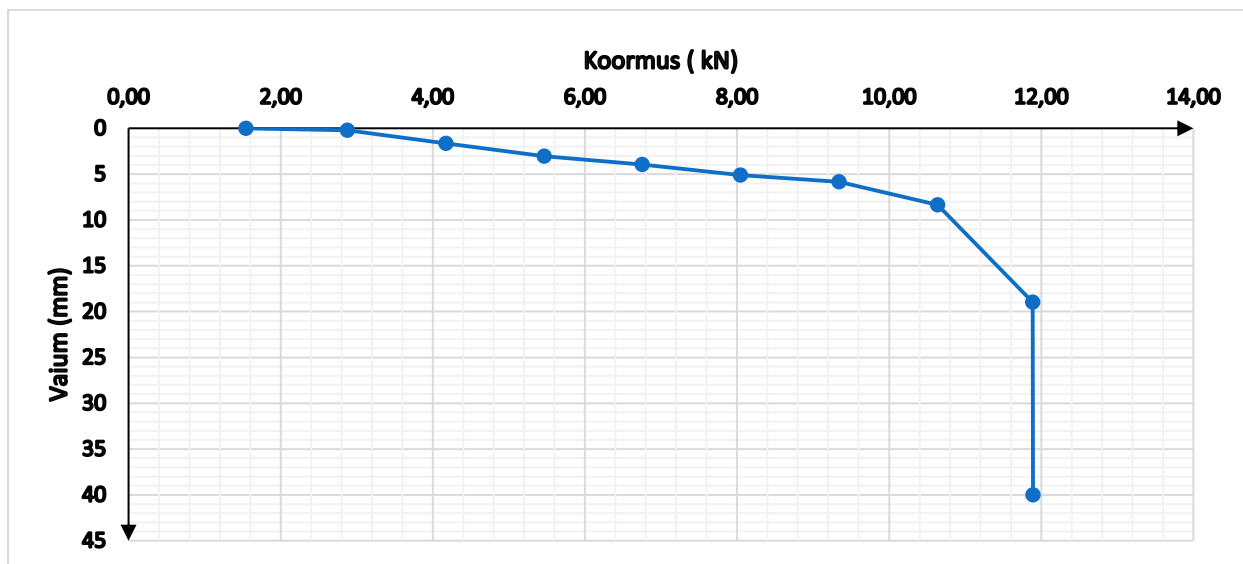
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatileise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	10,48	0
		2	10,48	0
		5	10,48	0
1	2,88	0	10,69	0,21
		2	10,69	0,21
		5	10,69	0,21
2	4,17	0	12,13	1,65
		2	12,13	1,65
		5	12,13	1,65
3	5,47	0	13,4	2,92
		2	13,52	3,04
		5	13,54	3,06
4	6,75	0	13,96	3,48
		2	14,44	3,96
		5	14,45	3,97
5	8,04	0	15,17	4,69
		2	15,59	5,11
		5	15,6	5,12
6	9,34	0	16,33	5,85
		2	16,14	5,66
		5	16,33	5,85

7	10,64	0	17,96	7,48
		2	18,55	8,07
		5	18,83	8,35
8	11,89	0	20,96	10,48
		2	24,35	13,87
		5	29,46	18,98
8	11,89	5	50,48	40



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

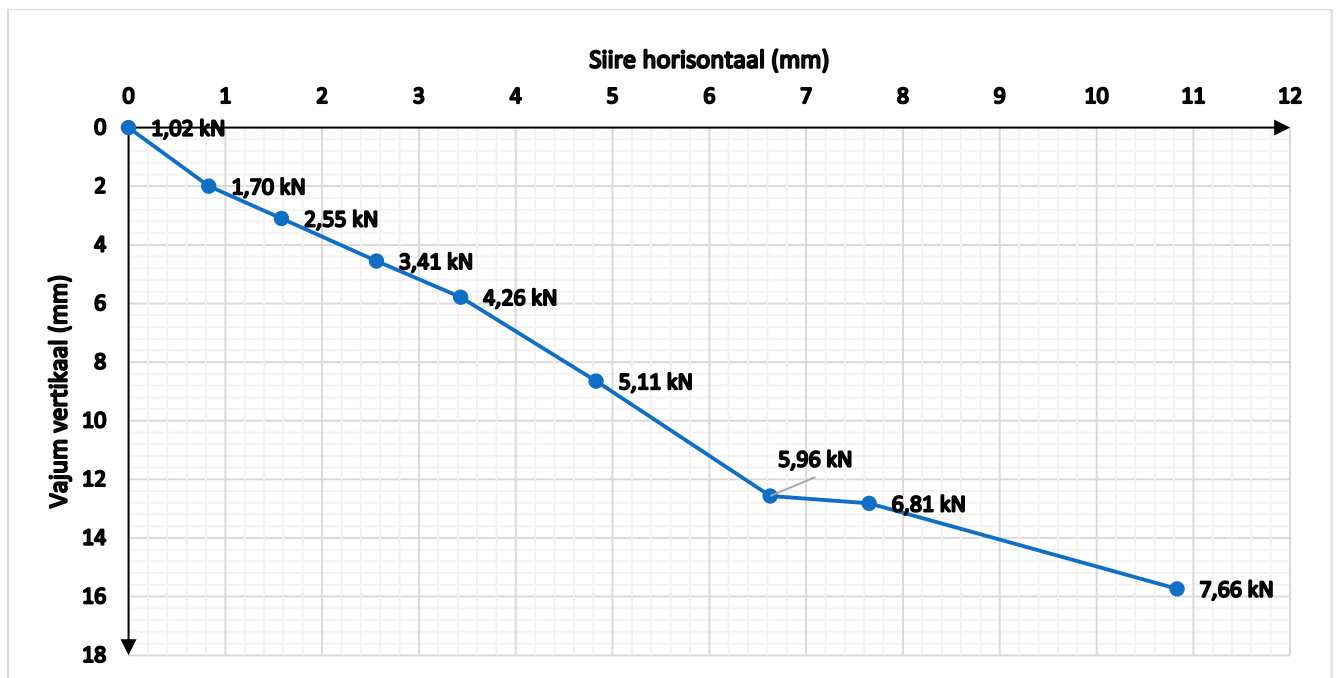
Vertikaalkoormus

10,64

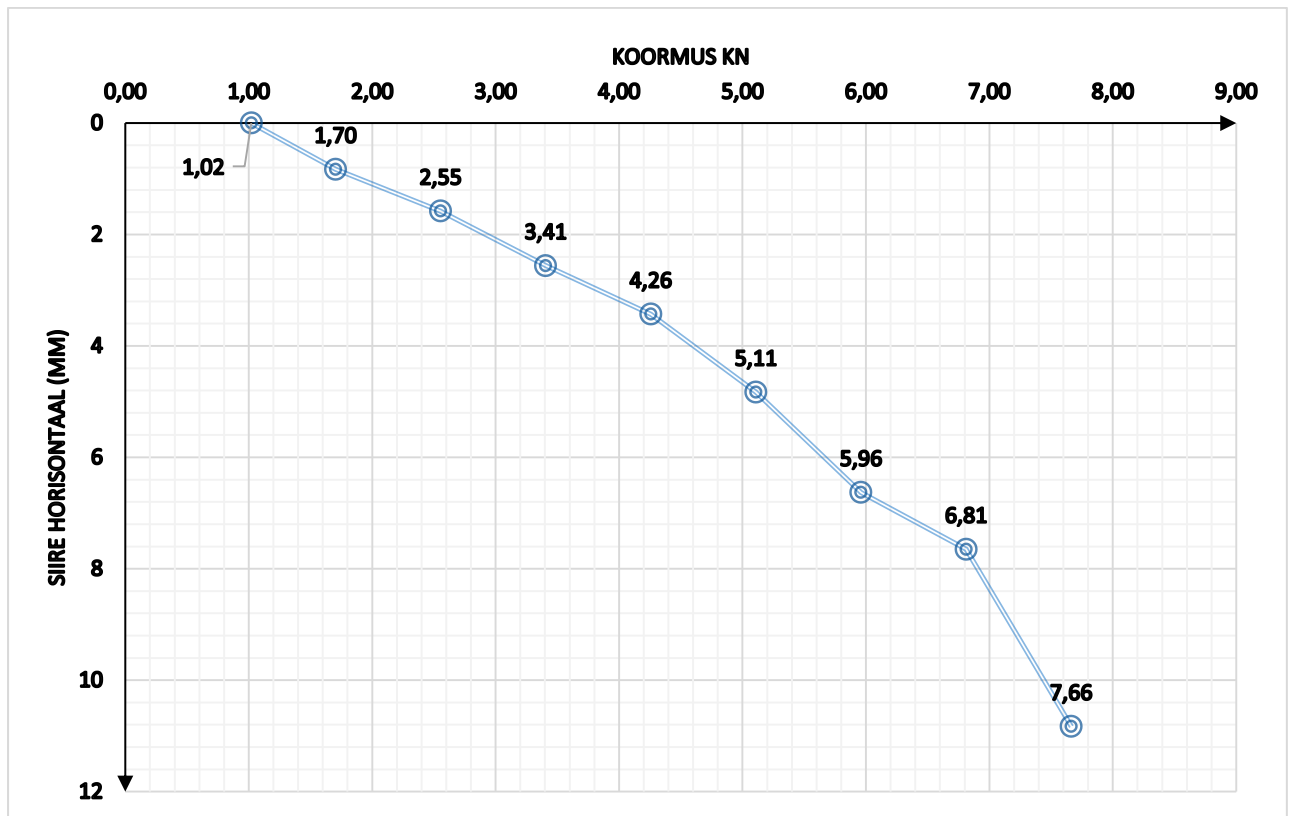
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	3,02	52,08	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	3,02	52,1	0	0,02
	5	2,4	1,21	1,02	3,02	52,1	0	0,02
1	0	4	2,02	1,70	3,81	53,65	0,79	1,57
	2	4	2,02	1,70	3,84	54,04	0,82	1,96
	5	4	2,02	1,70	3,85	54,1	0,83	2,02
2	0	6	3,03	2,55	4,22	54,49	1,2	2,41
	2	6	3,03	2,55	4,56	55,02	1,54	2,94
	5	6	3,03	2,55	4,6	55,2	1,58	3,12
3	0	8	4,04	3,41	5,2	55,6	2,18	3,52
	2	8	4,04	3,41	5,33	56,48	2,31	4,4
	5	8	4,04	3,41	5,58	56,65	2,56	4,57
4	0	10	5,05	4,26	6,05	56,96	3,03	4,88
	2	10	5,05	4,26	6,41	57,6	3,39	5,52
	5	10	5,05	4,26	6,45	57,88	3,43	5,8
5	0	12	6,06	5,11	7,1	58,17	4,08	6,09

	2	12	6,06	5,11	7,78	60,32	4,76	8,24
	5	12	6,06	5,11	7,85	60,75	4,83	8,67
6	0	14	7,07	5,96	8,65	61,6	5,63	9,52
	2	14	7,07	5,96	9,63	64,62	6,61	12,54
	5	14	7,07	5,96	9,65	64,67	6,63	12,59
7	0	16	8,08	6,81	10,25	64,67	7,23	12,59
	2	16	8,08	6,81	10,52	64,62	7,5	12,54
	5	16	8,08	6,81	10,67	64,92	7,65	12,84
8	0	18	9,09	7,66	11,28	64,97	8,26	12,89
	2	18	9,09	7,66	12,57	66,15	9,55	14,07
	5	18	9,09	7,66	13,85	67,83	10,83	15,75



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

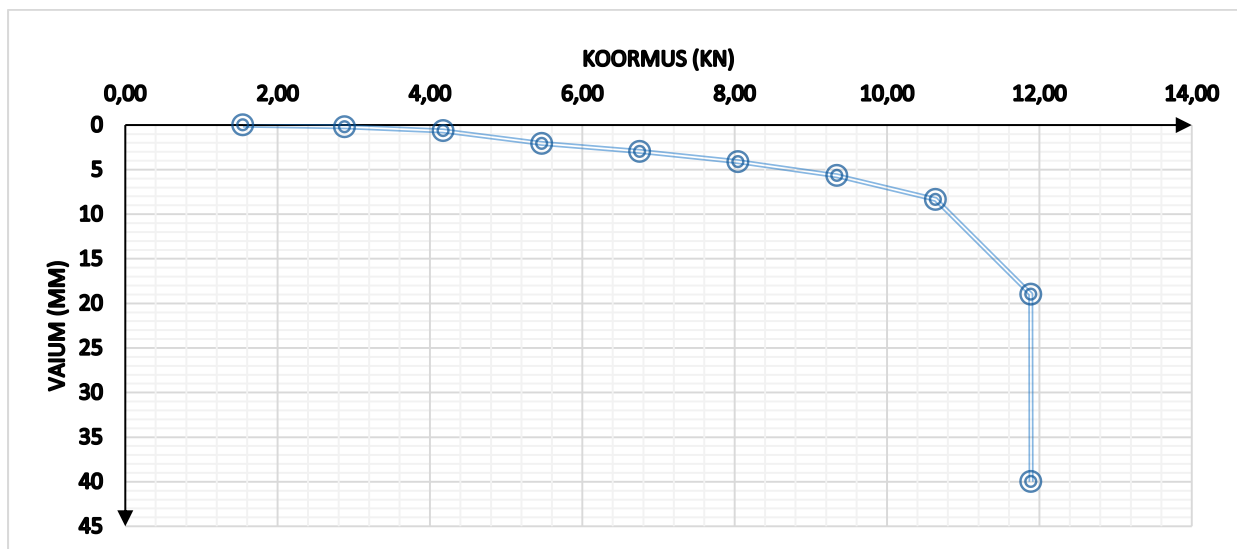
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatileise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	12,48	0
		2	12,48	0
		5	12,48	0
1	2,88	0	12,69	0,21
		2	12,69	0,21
		5	12,69	0,21
2	4,17	0	13,13	0,65
		2	13,13	0,65
		5	13,13	0,65
3	5,47	0	14,4	1,92
		2	14,52	2,04
		5	14,54	2,06
4	6,75	0	14,96	2,48
		2	15,44	2,96
		5	15,45	2,97
5	8,04	0	16,17	3,69
		2	16,59	4,11
		5	16,6	4,12
6	9,34	0	17,33	4,85
		2	18,14	5,66
		5	18,16	5,68

7	10,64	0	18,96	6,48
		2	20,55	8,07
		5	20,83	8,35
8	11,89	0	22,96	10,48
		2	26,35	13,87
		5	31,46	18,98
8	11,89	5	52,48	40



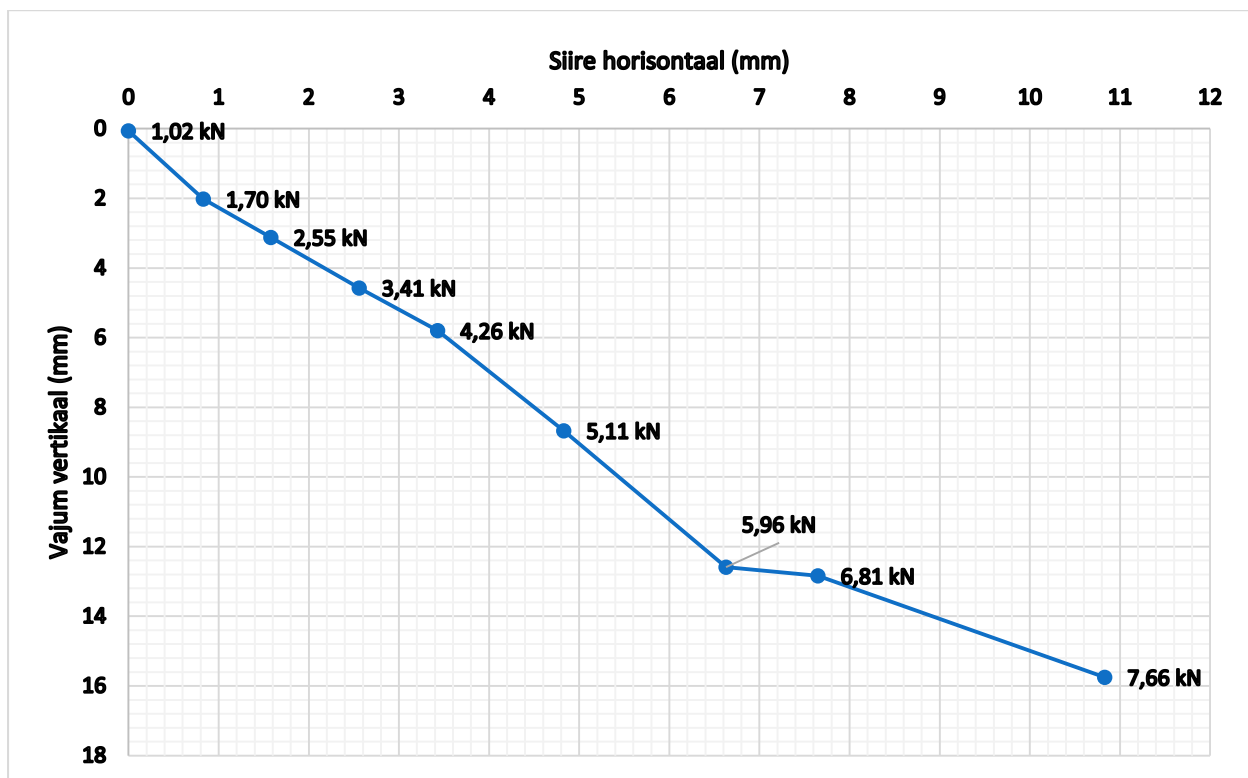
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 10,64 kN

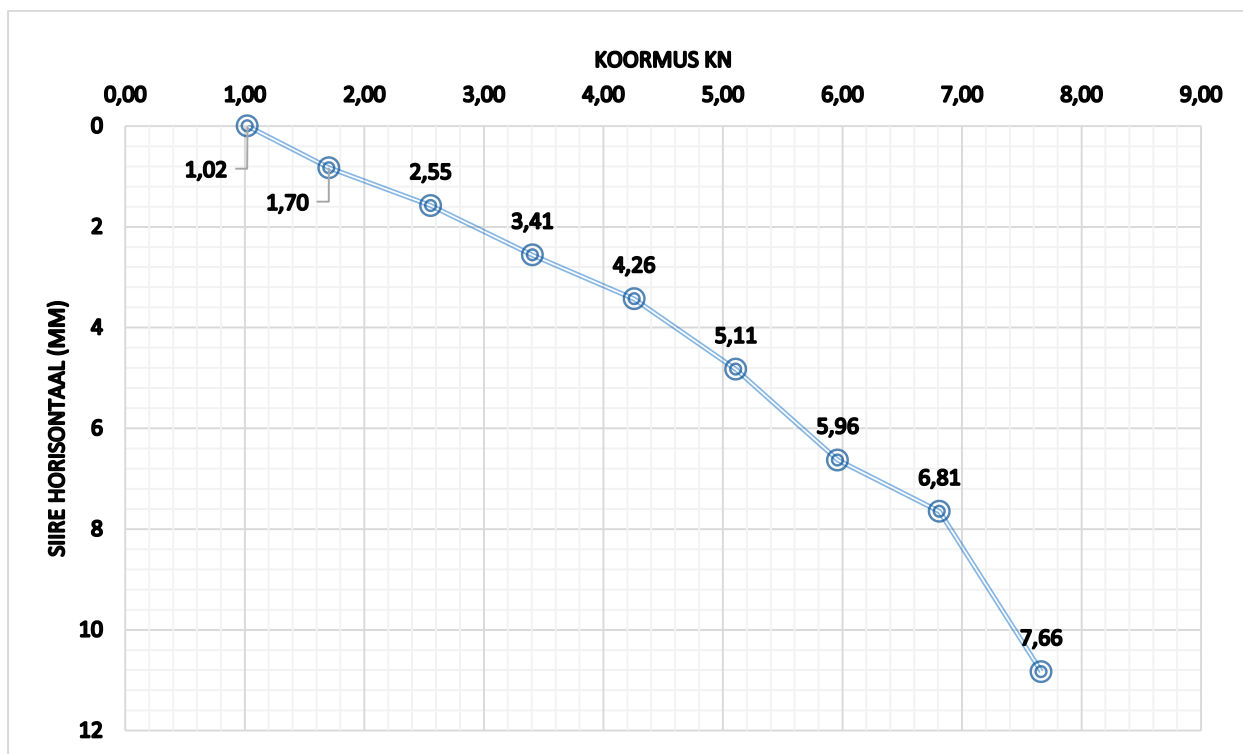
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	4,02	53,08	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	4,02	53,1	0	0,02
	5	2,4	1,21	1,02	4,02	53,14	0	0,06
1	0	4	2,02	1,70	4,81	54,65	0,79	1,57
	2	4	2,02	1,70	4,84	55,04	0,82	1,96
	5	4	2,02	1,70	4,85	55,1	0,83	2,02
2	0	6	3,03	2,55	5,22	55,49	1,2	2,41
	2	6	3,03	2,55	5,56	56,02	1,54	2,94
	5	6	3,03	2,55	5,6	56,2	1,58	3,12
3	0	8	4,04	3,41	6,2	55,6	2,18	2,52
	2	8	4,04	3,41	6,33	57,48	2,31	4,4
	5	8	4,04	3,41	6,58	57,65	2,56	4,57
4	0	10	5,05	4,26	7,05	57,96	3,03	4,88
	2	10	5,05	4,26	7,41	58,6	3,39	5,52
	5	10	5,05	4,26	7,45	58,88	3,43	5,8
5	0	12	6,06	5,11	8,1	59,17	4,08	6,09
	2	12	6,06	5,11	8,78	61,32	4,76	8,24

	5	12	6,06	5,11	8,85	61,75	4,83	8,67
6	0	14	7,07	5,96	9,65	62,6	5,63	9,52
	2	14	7,07	5,96	10,63	65,62	6,61	12,54
	5	14	7,07	5,96	10,65	65,67	6,63	12,59
7	0	16	8,08	6,81	11,25	65,67	7,23	12,59
	2	16	8,08	6,81	11,52	65,62	7,5	12,54
	5	16	8,08	6,81	11,67	64,92	7,65	11,84
8	0	18	9,09	7,66	12,28	65,97	8,26	12,89
	2	18	9,09	7,66	13,57	67,15	9,55	14,07
	5	18	9,09	7,66	14,85	68,83	10,83	15,75



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

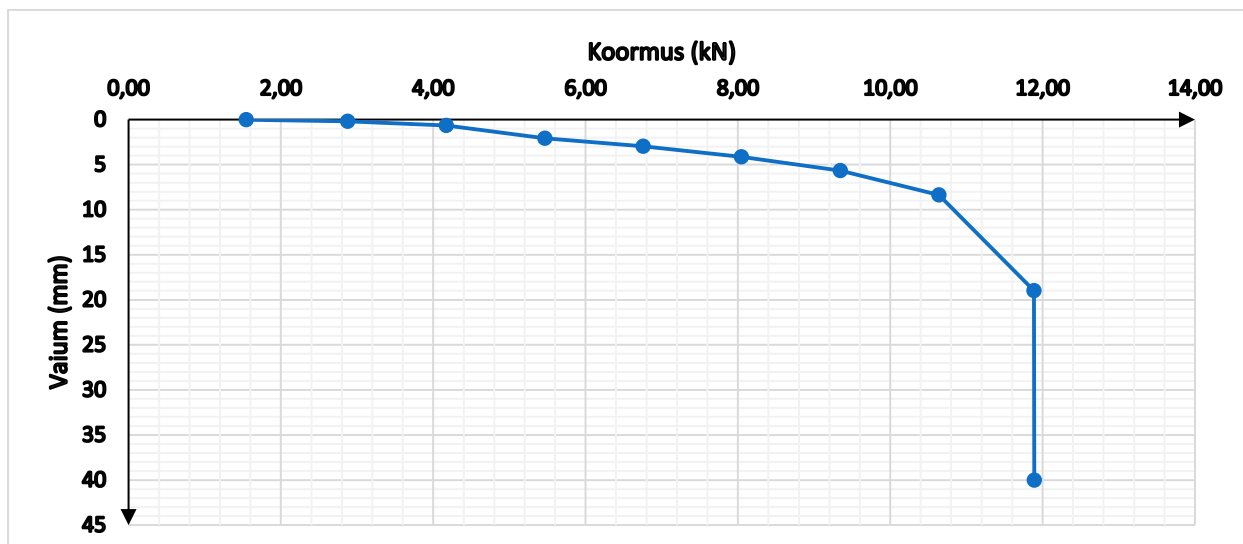
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	13,48	0
		2	13,48	0
		5	13,48	0
1	2,88	0	13,69	0,21
		2	13,69	0,21
		5	13,69	0,21
2	4,17	0	14,13	0,65
		2	14,13	0,65
		5	14,13	0,65
3	5,47	0	15,4	1,92
		2	15,52	2,04
		5	15,54	2,06
4	6,75	0	15,96	2,48
		2	16,44	2,96
		5	16,45	2,97
5	8,04	0	17,17	3,69
		2	17,59	4,11
		5	17,6	4,12
6	9,34	0	18,33	4,85
		2	19,14	5,66
		5	19,16	5,68

7	10,64	0	19,96	6,48
		2	21,55	8,07
		5	21,83	8,35
8	11,89	0	23,96	10,48
		2	27,35	13,87
		5	32,46	18,98
8	11,89	5	53,48	40



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

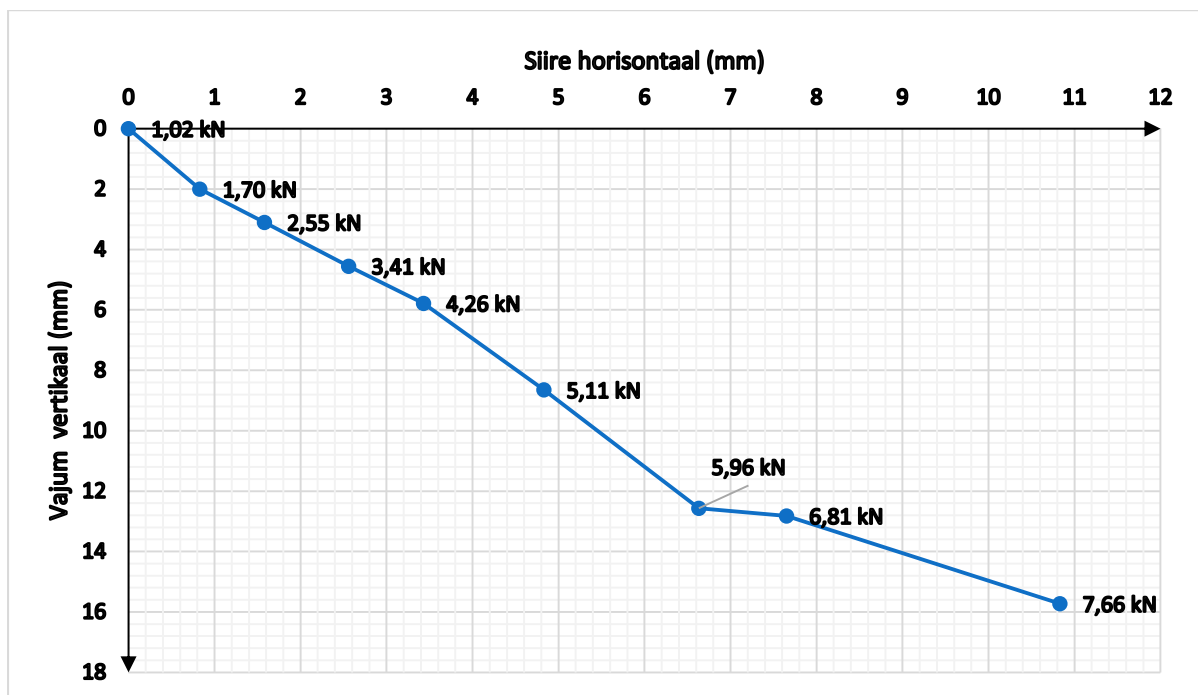
Vertikaalkoormus

10,64

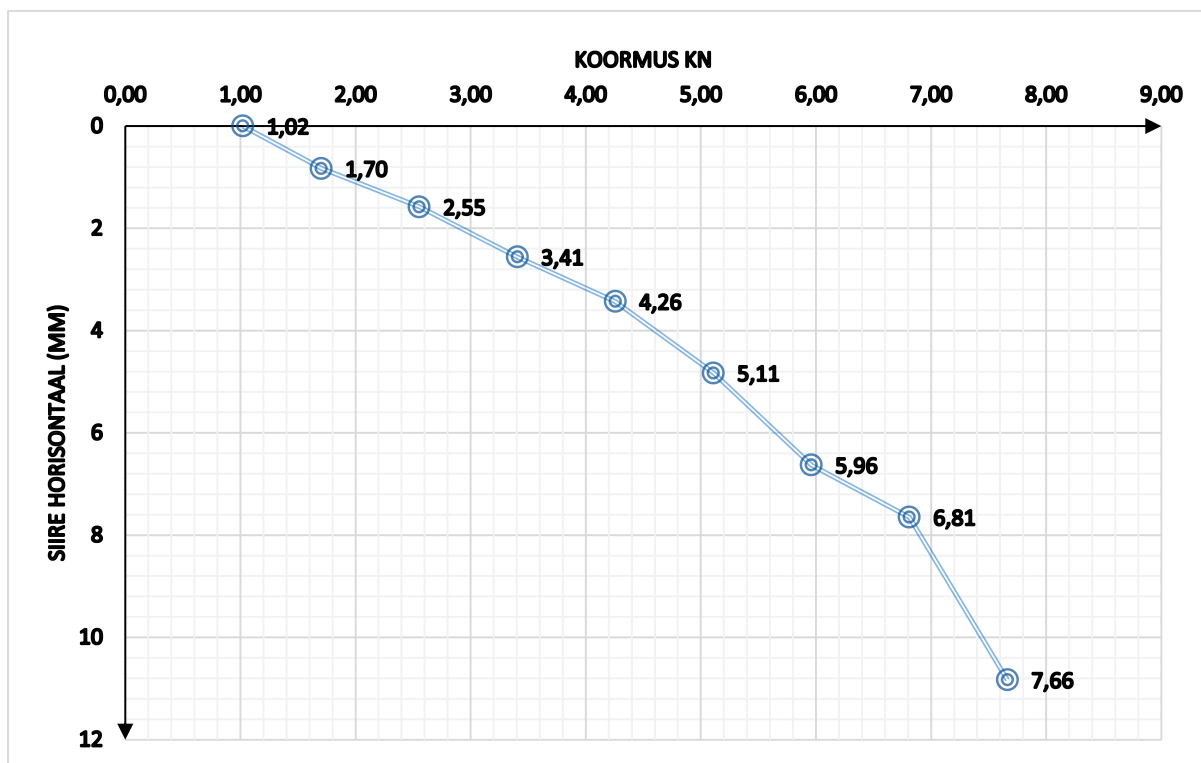
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	5,02	54,08	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	5,02	54,1	0	0,02
	5	2,4	1,21	1,02	5,02	54,1	0	0,02
1	0	4	2,02	1,70	5,81	55,65	0,79	1,57
	2	4	2,02	1,70	5,84	56,04	0,82	1,96
	5	4	2,02	1,70	5,85	56,1	0,83	2,02
2	0	6	3,03	2,55	6,22	56,49	1,2	2,41
	2	6	3,03	2,55	6,56	57,02	1,54	2,94
	5	6	3,03	2,55	6,6	57,2	1,58	3,12
3	0	8	4,04	3,41	7,2	57,6	2,18	3,52
	2	8	4,04	3,41	7,33	58,48	2,31	4,4
	5	8	4,04	3,41	7,58	58,65	2,56	4,57
4	0	10	5,05	4,26	8,05	58,96	3,03	4,88
	2	10	5,05	4,26	8,41	59,6	3,39	5,52
	5	10	5,05	4,26	8,45	59,88	3,43	5,8
5	0	12	6,06	5,11	9,1	60,17	4,08	6,09
	2	12	6,06	5,11	9,78	62,32	4,76	8,24

	5	12	6,06	5,11	9,85	62,75	4,83	8,67
6	0	14	7,07	5,96	10,65	63,6	5,63	9,52
	2	14	7,07	5,96	11,63	66,62	6,61	12,54
	5	14	7,07	5,96	11,65	66,67	6,63	12,59
7	0	16	8,08	6,81	12,25	66,67	7,23	12,59
	2	16	8,08	6,81	12,52	66,62	7,5	12,54
	5	16	8,08	6,81	12,67	66,92	7,65	12,84
8	0	18	9,09	7,66	13,28	66,97	8,26	12,89
	2	18	9,09	7,66	14,57	68,15	9,55	14,07
	5	18	9,09	7,66	15,85	69,83	10,83	15,75



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseedme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

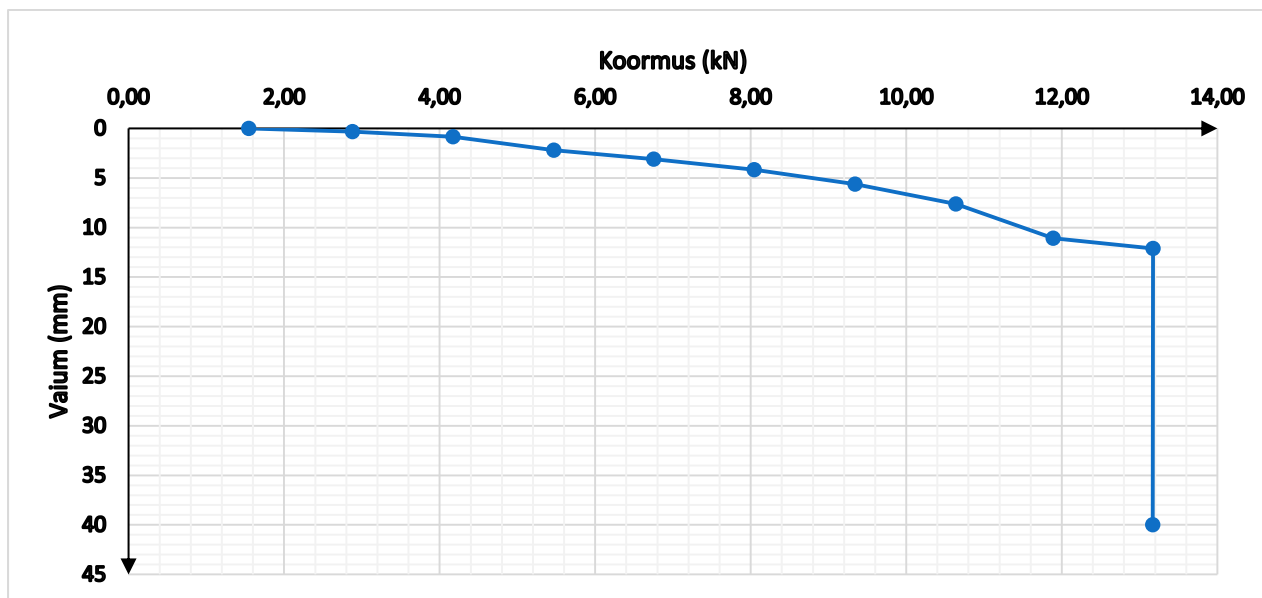
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,6	0,53
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	10,66	0
		2	10,66	0
		5	10,66	0
1	2,88	0	10,95	0,29
		2	10,99	0,33
		5	11	0,34
2	4,17	0	11,35	0,69
		2	11,48	0,82
		5	11,5	0,84
3	5,47	0	12,12	1,46
		2	12,84	2,18
		5	12,85	2,19
4	6,75	0	13,13	2,47
		2	13,72	3,06
		5	13,76	3,1
5	8,04	0	14,05	3,39
		2	14,8	4,14
		5	14,83	4,17
6	9,34	0	15,4	4,74
		2	16,2	5,54
		5	16,27	5,61
7	10,64	0	16,75	6,09
		2	18,12	7,46
		5	18,29	7,63
8	11,89	0	18,8	8,14

		2	21,35	10,69
		5	21,75	11,09
9	13,17	0	22,49	11,83
		2	22,58	11,92
		5	22,78	12,12
9	13,17	5	50,66	40



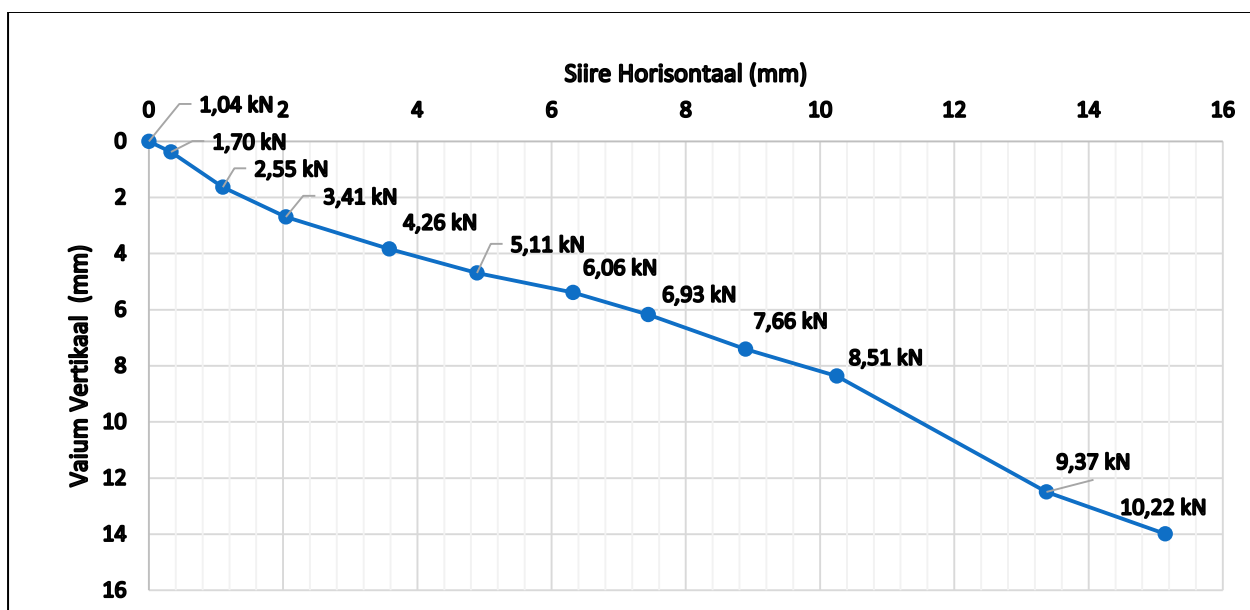
Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

Vertikaalkoormus 11,89 kN

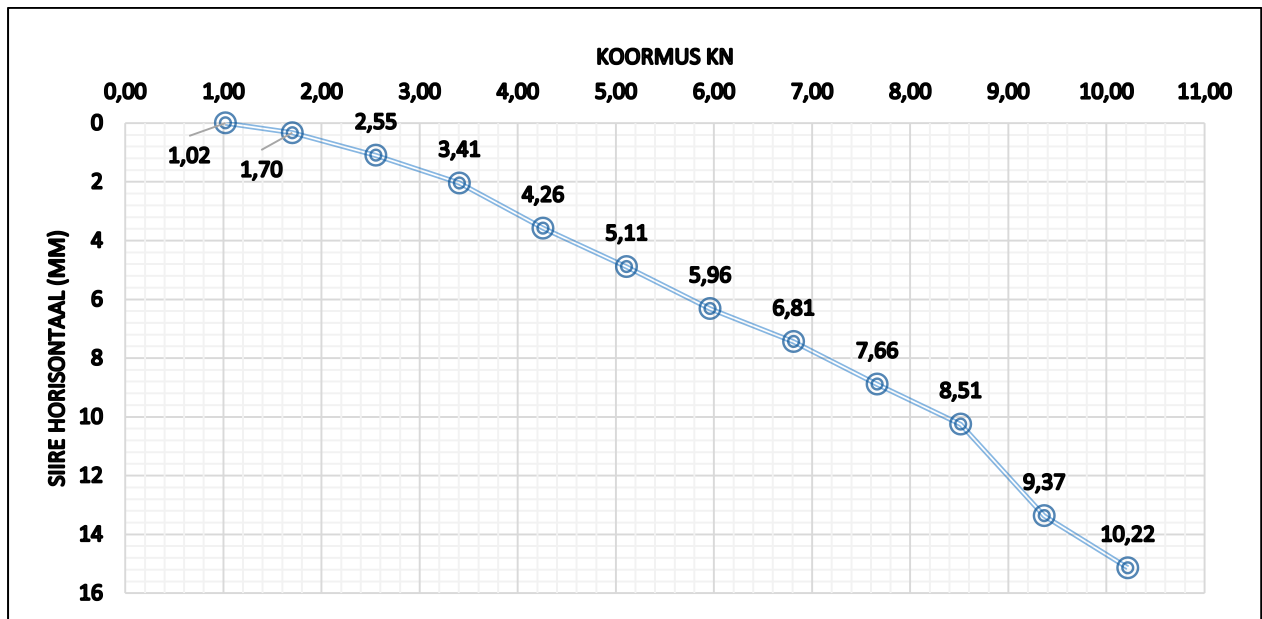
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	3,31	29,61	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	3,31	29,61	0	0
	5	2,4	1,21	1,02	3,31	29,61	0	0
1	0	4	2,02	1,70	3,45	29,8	0,14	0,19
	2	4	2,02	1,70	3,62	29,95	0,31	0,34
	5	4	2,02	1,70	3,64	29,99	0,33	0,38
2	0	6	3,03	2,55	4,05	30,51	0,74	0,9
	2	6	3,03	2,55	4,37	31,09	1,06	1,48
	5	6	3,03	2,55	4,41	31,25	1,1	1,64
3	0	8	4,04	3,41	5,04	31,58	1,73	1,97
	2	8	4,04	3,41	5,29	32,4	1,98	2,79
	5	8	4,04	3,41	5,35	32,3	2,04	2,69
4	0	10	5,05	4,26	6,08	32,5	2,77	2,89
	2	10	5,05	4,26	6,77	33,15	3,46	3,54
	5	10	5,05	4,26	6,89	33,45	3,58	3,84

5	0	12	6,06	5,11	7,58	33,57	4,27	3,96
	2	12	6,06	5,11	8,08	34,09	4,77	4,48
	5	12	6,06	5,11	8,2	34,3	4,89	4,69
6	0	14	7,07	5,96	8,85	34,36	5,54	4,75
	2	14	7,07	5,96	9,55	34,94	6,24	5,33
	5	14	7,07	5,96	9,63	35	6,32	5,39
7	0	16	8,08	6,81	10,16	35,09	6,85	5,48
	2	16	8,08	6,81	10,62	35,6	7,31	5,99
	5	16	8,08	6,81	10,75	35,78	7,44	6,17
8	0	18	9,09	7,66	11,4	35,88	8,09	6,27
	2	18	9,09	7,66	12,11	36,7	8,8	7,09
	5	18	9,09	7,66	12,2	37,02	8,89	7,41
9	0	20	10,10	8,51	12,98	37,13	9,67	7,52
	2	20	10,10	8,51	13,49	37,78	10,18	8,17
	5	20	10,10	8,51	13,56	37,97	10,25	8,36
10	0	22	11,11	9,36	14,3	38,24	10,99	8,63
	2	22	11,11	9,36	16,33	41,17	13,02	11,56
	5	22	11,11	9,36	16,68	42,1	13,37	12,49
11	0	24	12,12	10,21	17,2	42,42	13,89	12,81
	2	24	12,12	10,21	18,34	43,4	15,03	13,79
	5	24	12,12	10,21	18,45	43,6	15,14	13,99



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik





Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

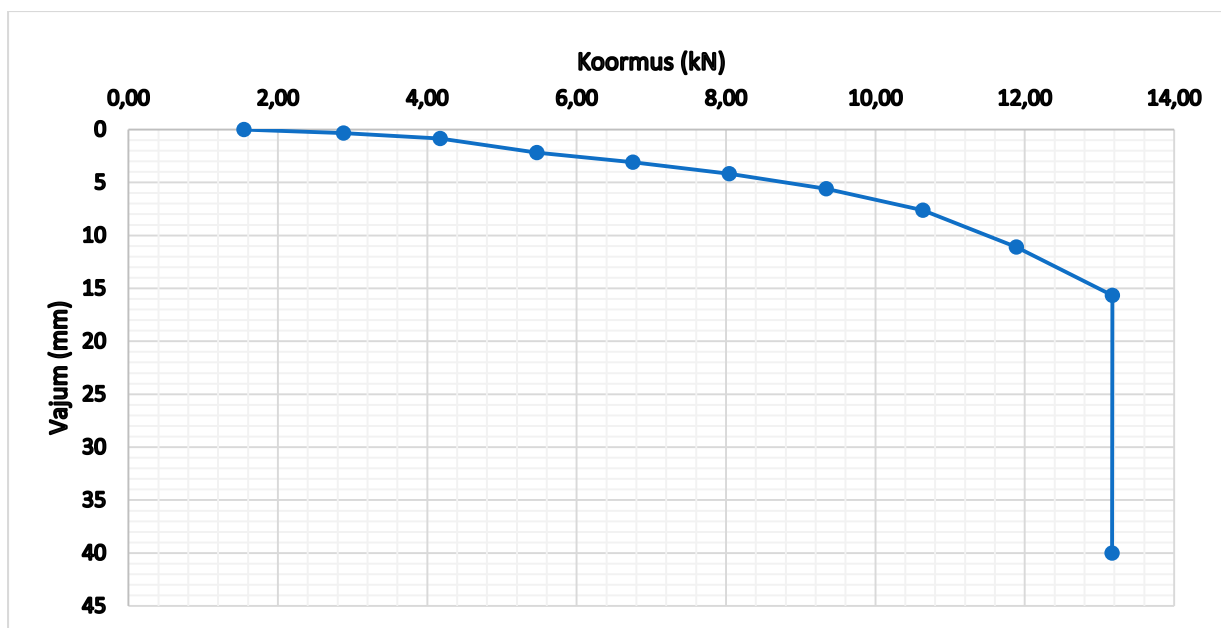
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,5	0,5
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2 Staatiline koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	9,66	0
		2	9,66	0
		5	9,66	0
1	2,88	0	9,95	0,29
		2	9,55	-0,11
		5	10	0,34
2	4,17	0	10,35	0,69
		2	10,48	0,82
		5	10,5	0,84
3	5,47	0	11,12	1,46
		2	11,84	2,18
		5	11,85	2,19
4	6,75	0	12,13	2,47
		2	12,72	3,06
		5	12,76	3,1
5	8,04	0	13,05	3,39
		2	13,8	4,14
		5	13,83	4,17
6	9,34	0	14,4	4,74
		2	15,2	5,54
		5	15,27	5,61
7	10,64	0	15,75	6,09
		2	17,12	7,46

		5	17,29	7,63
8	11,89	0	17,8	8,14
		2	20,35	10,69
		5	20,75	11,09
9	13,17	0	21,49	11,83
		2	21,54	11,88
		5	21,58	11,92
9	13,17	5	49,66	40



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

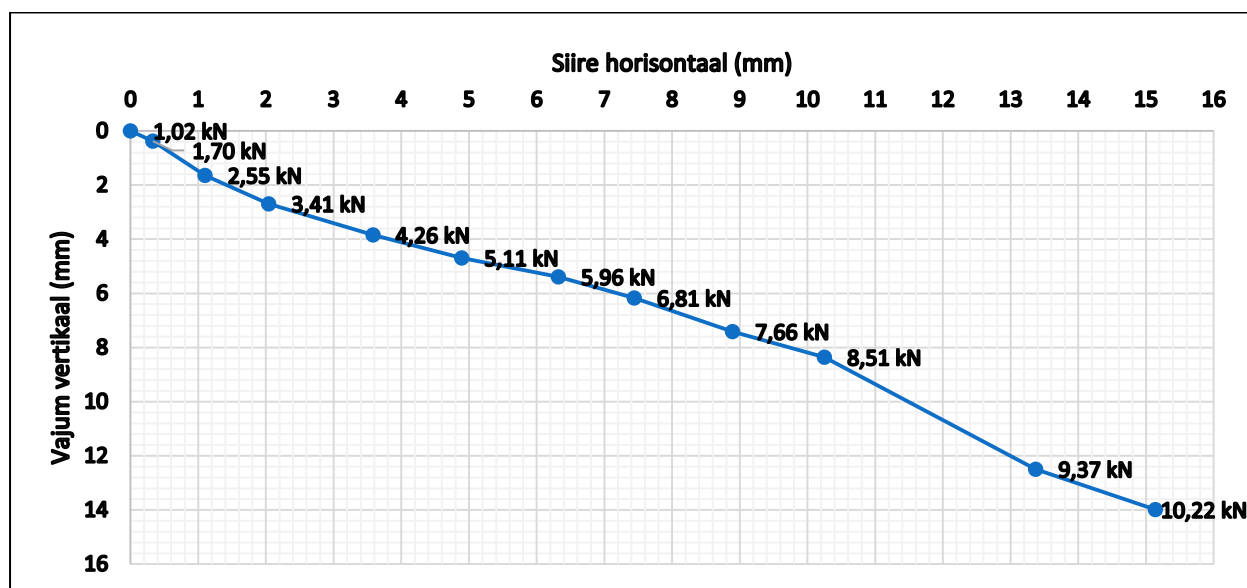
Vertikaalkoormus

11,89

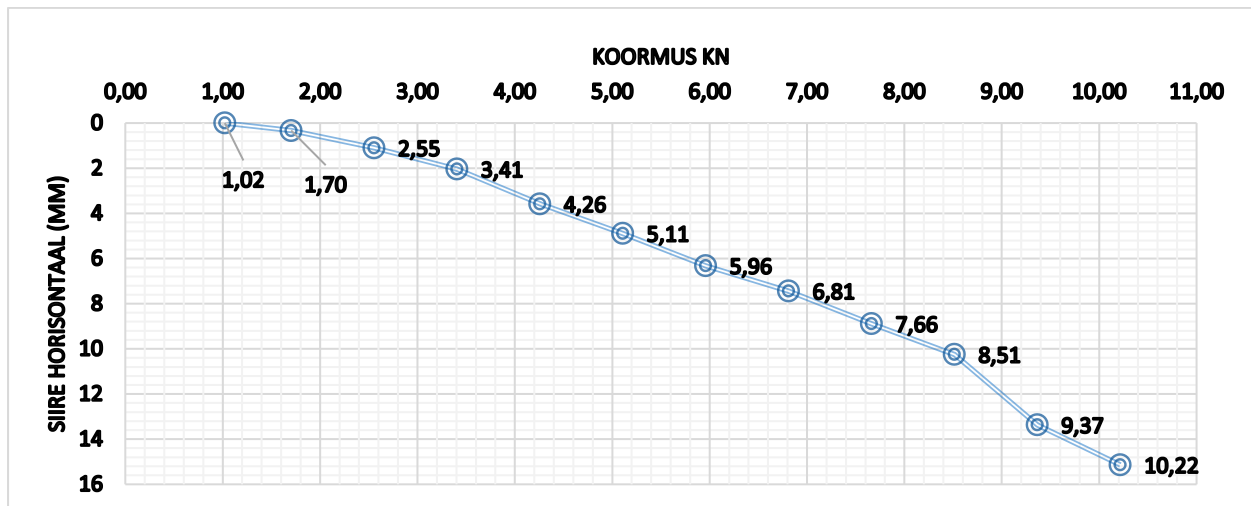
kN

Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
	5	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
1	0	4	2,02	1,70	2,45	28,8	0,14	0,19
	2	4	2,02	1,70	2,62	28,95	0,31	0,34
	5	4	2,02	1,70	2,64	28,99	0,33	0,38
2	0	6	3,03	2,55	3,05	29,51	0,74	0,9
	2	6	3,03	2,55	3,37	30,09	1,06	1,48
	5	6	3,03	2,55	3,41	30,25	1,1	1,64
3	0	8	4,04	3,41	4,04	30,58	1,73	1,97
	2	8	4,04	3,41	4,29	31,4	1,98	2,79
	5	8	4,04	3,41	4,35	31,3	2,04	2,69

4	0	10	5,05	4,26	5,08	31,5	2,77	2,89
	2	10	5,05	4,26	5,77	32,15	3,46	3,54
	5	10	5,05	4,26	5,89	32,45	3,58	3,84
5	0	12	6,06	5,11	6,58	32,57	4,27	3,96
	2	12	6,06	5,11	7,08	33,09	4,77	4,48
	5	12	6,06	5,11	7,2	33,3	4,89	4,69
6	0	14	7,07	5,96	7,85	33,36	5,54	4,75
	2	14	7,07	5,96	8,85	33,94	6,54	5,33
	5	14	7,07	5,96	8,63	34	6,32	5,39
7	0	16	8,08	6,81	9,16	34,9	6,85	6,29
	2	16	8,08	6,81	9,62	34,6	7,31	5,99
	5	16	8,08	6,81	9,75	35,78	7,44	7,17
8	0	18	9,09	7,66	10,4	34,88	8,09	6,27
	2	18	9,09	7,66	11,11	35,7	8,8	7,09
	5	18	9,09	7,66	11,2	36,02	8,89	7,41
9	0	20	10,10	8,51	11,98	36,13	9,67	7,52
	2	20	10,10	8,51	12,49	36,78	10,18	8,17
	5	20	10,10	8,51	12,56	36,97	10,25	8,36
10	0	22	11,11	9,36	13,3	37,24	10,99	8,63
	2	22	11,11	9,36	15,33	40,17	13,02	11,56
	5	22	11,11	9,36	15,68	41,1	13,37	12,49
11	0	24	12,12	10,21	16,2	41,42	13,89	12,81
	2	24	12,12	10,21	17,34	42,4	15,03	13,79
	5	24	12,12	10,21	17,45	42,6	15,14	13,99



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik

Märkused:

**1. Dünaamiline katse**

Tabel 1.1 Vaia ja rammimisseadme alane informatsioon

Vasara kaal (g)	<b>6086</b>	Vaia materjal ja mudel	<b>KV40/6T (metall)</b>
Vasara langemiskõrgus (cm)	<b>60</b>	Vaia kaal koos juhtvardaga (g)	<b>6968</b>

Tabel 1.2 Dünaamilise katsetuse mõõtmised

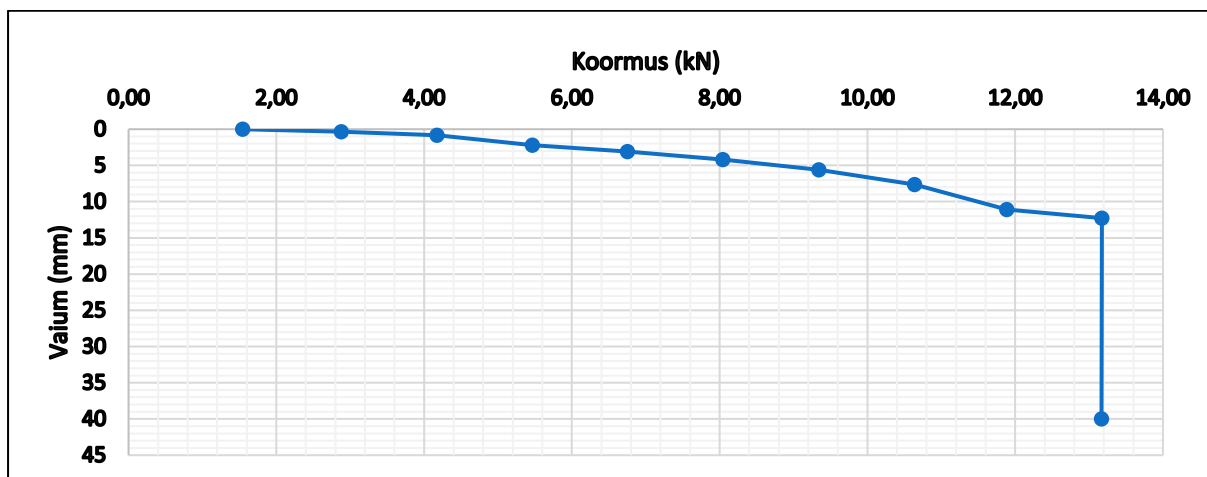
Järjekorra nr	Löökide arv	Mõõdetud vajum (cm)	Vajum ühest löögist ehk vaste (cm)
1	3	1,4	0,46
2	3	1,2	0,4
3	3	1,2	0,4

**2. Staatileine koormuskatse**

Tabel 2.1 Staatilise katsetuse mõõtetulemused

Koormus plaadite arv	Koormus aste (kN)	Aeg (min)	Nihkeanduri lugem (mm)	Siire (mm)
0	1,54	0	12,16	2,5
		2	12,16	2,5
		5	12,16	2,5
1	2,88	0	12,45	2,79
		2	12,49	2,83
		5	12,5	2,84
2	4,17	0	12,85	3,19
		2	12,98	3,32
		5	13	3,34
3	5,47	0	13,62	3,96
		2	14,34	4,68
		5	14,35	4,69
4	6,75	0	14,63	4,97
		2	15,22	5,56
		5	15,26	5,6
5	8,04	0	15,55	5,89
		2	16,3	6,64
		5	16,33	6,67
6	9,34	0	16,9	7,24
		2	17,7	8,04
		5	17,77	8,11
7	10,64	0	18,25	8,59
		2	19,62	9,96
		5	19,79	10,13
8	11,89	0	20,3	10,64

		2	22,85	13,19
		5	23,25	13,59
9	13,17	0	23,99	14,33
		2	24,22	14,56
		5	24,45	14,79
9	13,17	5	52,16	40



Joonis 2.1 Staatilise koormuskatse graafik

## 3. Kiilvaia vertikaal ja horisontaalkoormusega katsetamine

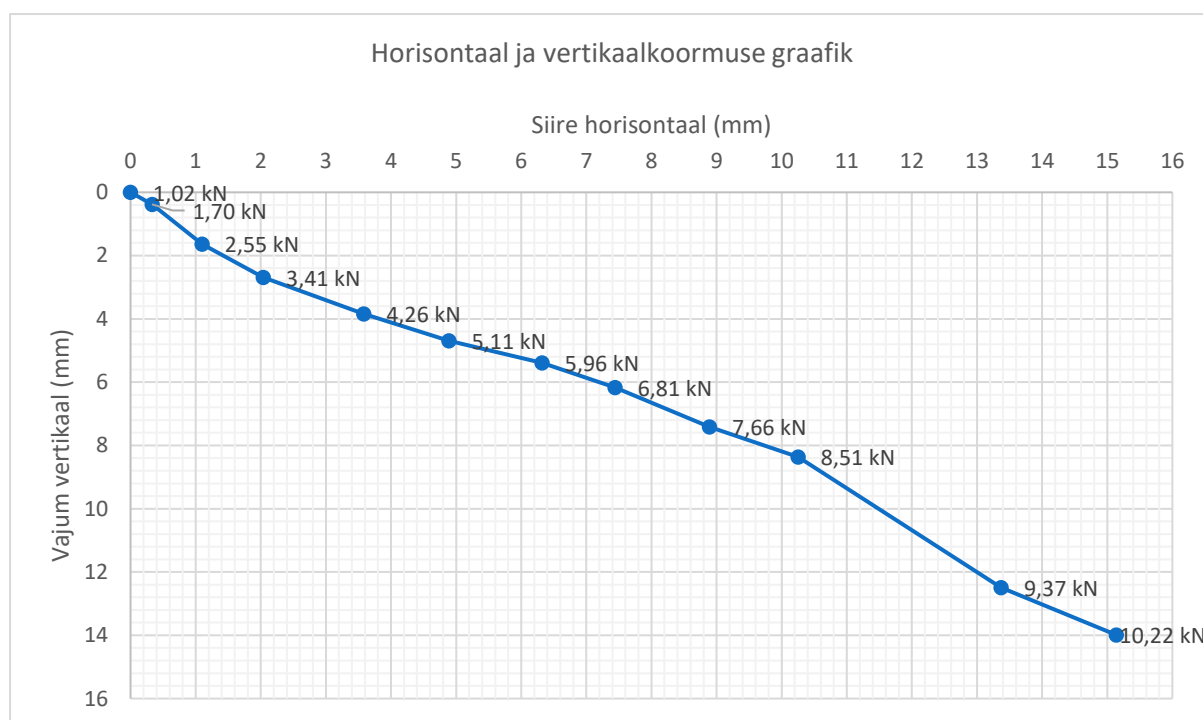
Vertikaalkoormus

11,89

kN

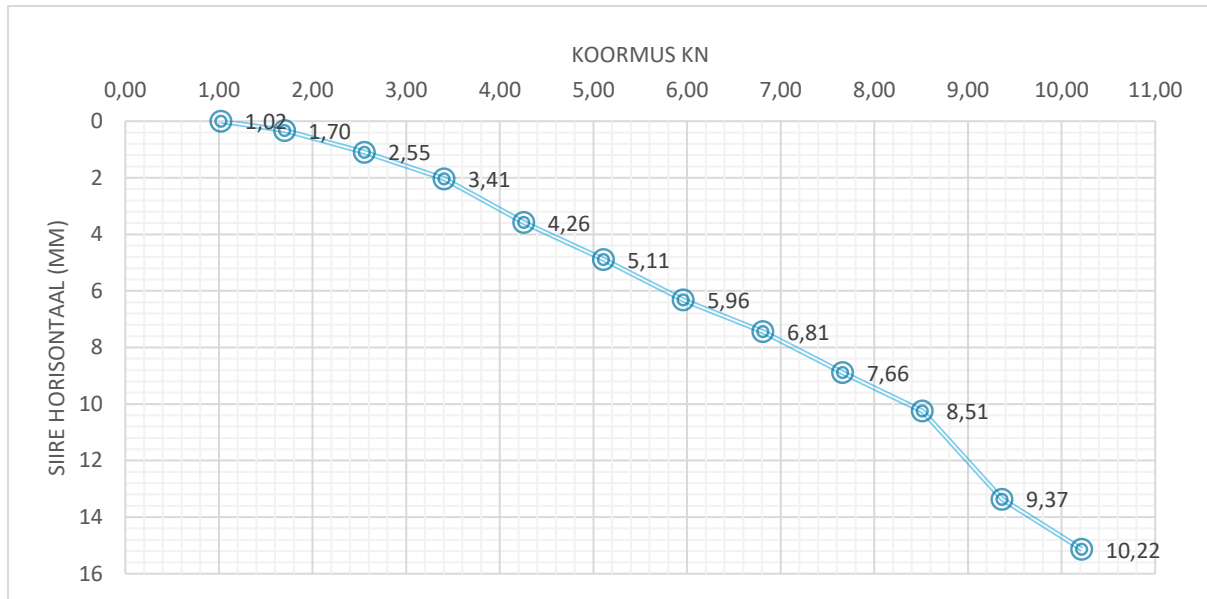
Järjekorra nr	Aeg (min)	Silindri surve näit (Bar)	Bar/1,98 (kN)	Tegelik Horisontaal koormus aste (kN)	Horisontaalse nihkeanduri lugem (mm)	Vertikaalse nihkeanduri lugem (mm)	Horisontaalne siire (mm)	Vertikaalne vajum (mm)
0	0	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
	2	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
	5	2,4	1,21	1,02	2,31	28,61	0	0
1	0	4	2,02	1,70	2,45	28,8	0,14	0,19
	2	4	2,02	1,70	2,62	28,95	0,31	0,34
	5	4	2,02	1,70	2,64	28,99	0,33	0,38
2	0	6	3,03	2,55	3,05	29,51	0,74	0,9
	2	6	3,03	2,55	3,37	30,09	1,06	1,48
	5	6	3,03	2,55	3,41	30,25	1,1	1,64
3	0	8	4,04	3,41	4,04	30,58	1,73	1,97
	2	8	4,04	3,41	4,29	31,4	1,98	2,79
	5	8	4,04	3,41	4,35	31,3	2,04	2,69
4	0	10	5,05	4,26	5,08	31,5	2,77	2,89
	2	10	5,05	4,26	5,77	32,15	3,46	3,54
	5	10	5,05	4,26	5,89	32,45	3,58	3,84
5	0	12	6,06	5,11	6,58	32,57	4,27	3,96
	2	12	6,06	5,11	7,08	33,09	4,77	4,48
	5	12	6,06	5,11	7,2	33,3	4,89	4,69

6	0	14	7,07	5,96	7,85	33,36	5,54	4,75
	2	14	7,07	5,96	8,85	33,94	6,54	5,33
	5	14	7,07	5,96	8,63	34	6,32	5,39
7	0	16	8,08	6,81	9,16	34,9	6,85	6,29
	2	16	8,08	6,81	9,62	34,6	7,31	5,99
	5	16	8,08	6,81	9,75	35,78	7,44	7,17
8	0	18	9,09	7,66	10,4	34,88	8,09	6,27
	2	18	9,09	7,66	11,11	35,7	8,8	7,09
	5	18	9,09	7,66	11,2	36,02	8,89	7,41
9	0	20	10,10	8,51	11,98	36,13	9,67	7,52
	2	20	10,10	8,51	12,49	36,78	10,18	8,17
	5	20	10,10	8,51	12,56	36,97	10,25	8,36
10	0	22	11,11	9,36	13,3	37,24	10,99	8,63
	2	22	11,11	9,36	15,33	40,17	13,02	11,56
	5	22	11,11	9,36	15,68	41,1	13,37	12,49
11	0	24	12,12	10,21	16,2	41,42	13,89	12,81
	2	24	12,12	10,21	17,34	42,4	15,03	13,79
	5	24	12,12	10,21	17,45	42,6	15,14	13,99



Joonis 3.1 Horisontaal ja vertikaalkoormuse graafik



**Joonis 4.1 Horisontaalkoormuse graafik**

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Tarko Jõgis,

(sünnikuupäev: 14.05.1987)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

Mudelkiilvaia uurimine vertikaal-ja horisontaalkoormuse koosmõjul.

mille juhendaja on Villu Lepik,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor Tarko Jõgis

---

Tartu, 22.05.2017

**Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Villu Leppik

---

Mait Mets

---